

**ANÁLISIS DE RIESGO HIDROMETEOROLÓGICO PARA LA NAVEGACIÓN  
MARÍTIMA EN EL RÍO MAGDALENA - SECTOR PORTUARIO DE  
BARRANQUILLA**

FRANCISCO JAVIER GOMEZ DIAZ

TESIS DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL

DIRECTORES DE LA INVESTIGACIÓN:

HUMBERTO ÁVILA RANGEL

RONALD GUTIERREZ LLANTOY

DIVISIÓN DE INGENIERIAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL



BARRANQUILLA-ATLÁNTICO

SEPTIEMBRE DEL 2020

## **NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

**JURADO**

---

**JURADO**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres Wilfredo y María y a mis hermanos Estefanía y Diego por la confianza depositada en mí, siempre brindándome apoyo constante e incondicional.

A mis directores de tesis Ronald Gutiérrez y Humberto Ávila por su acompañamiento, mentoría y enseñanzas tanto académicas como profesionales en este proceso formativo.

A la Universidad del Norte, al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, al Observatorio del Río Magdalena y el Laboratorio de Estudios Hidráulicos y Ambientales (IDEHA) por permitirme formarme como profesional y aplicar mis conocimientos en diferentes proyectos.

A mis compañeros de laboratorio Rubén, Alexander y Stephanie por compartirme sus experiencias luego de haber concluido sus estudios de postgrado. Y a mis amigos Nicolas, María Carolina y Carolina por brindarme la motivación a finalizar, hicieron del proceso memorable.

Sin todos ellos esto no fuese posible.

## **TABLA DE CONTENIDO**

TABLA DE CONTENIDO .....	4
RESUMEN .....	7
1 INTRODUCCIÓN .....	7
1.1 Planteamiento del problema .....	9
1.2 Justificación.....	11
1.3 OBJETIVOS.....	12
1.3.1 Objetivo general .....	12
1.3.2 Objetivos específicos .....	12
1.4 Alcances y limitaciones .....	12
2 ESTADO DEL ARTE.....	13
2.1 Herramientas usadas para la generación de modelos de riesgo .....	15
2.1.1 Análisis de árbol de fallas y árbol de eventos .....	16
2.1.2 Análisis a través de lógica difusa.....	16
2.1.3 Estudios de peligro y operatividad (HAZOP) y Análisis What-If .....	17
2.1.4 Redes Bayesianas .....	17
2.2 Identificación de variables representativas para análisis de riesgo a la navegación .....	18
3 MARCO TEÓRICO.....	21
3.1 Embarcaciones .....	21
3.1.1 Incidencia del viento.....	22
3.1.2 Incidencia del oleaje .....	23
3.1.3 Incidencia de la densidad del agua y velocidad de la embarcación .....	23
3.2 Caracterización estadística de variables.....	24
3.2.1 Análisis de frecuencias .....	24
3.2.2 Distribución de Probabilidad .....	24
3.2.3 Simulación de Montecarlo .....	25
3.3 Modelación 2D.....	25
3.3.1 Conjunto de ecuaciones que resuelve el modelo.....	28
3.4 Geometría hidráulica .....	30
4 METODOLOGÍA .....	32
4.1 Definición del sector de estudio y características .....	33
4.2 Definición de embarcaciones de diseño.....	33

4.3	Caracterización de las variables hidrometeorológicas .....	33
4.4	Modelación hidrodinámica 2D .....	34
4.5	Estimación del riesgo frente a escenarios aleatorios .....	34
4.5.1	Definición de niveles y generación de curvas de probabilidad de ocurrencia de variables hidrometeorológicas .....	36
4.5.2	Definición de niveles y generación de curvas de vulnerabilidad para variables hidrometeorológicas .....	36
4.5.3	Matriz de riesgo y evaluación de escenarios .....	37
5	IDENTIFICACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO: SECTOR PORTUARIO DE BARRANQUILLA .....	38
5.1	Generalidades del sector de estudio .....	38
5.1.1	Características generales de la navegación de en el sector y canal navegable.....	40
5.1.2	Evolución morfológica de la zona .....	42
5.1.3	Identificación de obstáculos a la navegación .....	44
5.1.4	Caracterización de accidentalidad en el sector .....	45
5.2	Mesa de trabajo con expertos .....	47
5.3	Identificación de embarcaciones de análisis .....	49
5.4	Análisis probabilístico de variables hidrometeorológicas .....	51
5.4.1	Geometría hidráulica .....	51
5.4.2	Caracterización hidrológica .....	54
5.4.3	Viento .....	61
5.4.4	Oleaje .....	70
5.4.5	Marea.....	75
5.5	Modelación hidrodinámica 2D .....	77
5.5.1	Definición del sector de estudio para modelación.....	77
5.5.2	Recopilación de información base y montaje del modelo .....	77
5.5.3	Calibración del modelo.....	78
5.5.4	Resultados modelo hidrodinámico.....	79
6	MODELO DE RIESGO A LA NAVEGACIÓN .....	81
6.1	Generación de curvas de vulnerabilidad y probabilidad .....	81
6.1.1	Viento .....	81
6.1.2	Oleaje .....	83
6.1.3	Profundidad operativa.....	84

6.1.4	Velocidad .....	86
6.2	Escenarios y evaluación de riesgo .....	87
6.2.1	Riesgo de encallamiento .....	87
6.2.2	Riesgo de deriva por viento .....	90
6.2.3	Riesgo de pérdida de maniobrabilidad por oleaje .....	93
6.2.4	Riesgo de pérdida de maniobrabilidad por velocidad de la corriente .....	94
6.2.5	Riesgo de navegabilidad conjunta .....	96
7	CONCLUSIONES .....	100
8	REFERENCIAS .....	103
9	ANEXOS .....	109

## RESUMEN

Dentro de la actividad portuaria, la caracterización y cuantificación del riesgo es esencial para la determinación de los principales factores que pueden generar incidentes, y permite definir estrategias de mitigación de riesgos para mejorar la seguridad y operatividad de los puertos. A pesar de que el riesgo es un tema que ha sido estudiado en mayor medida en los últimos años, no se ha evaluado en profundidad la influencia de las variables de tipo hidrometeorológico y su incidencia en la navegación de embarcaciones en canales navegables. En la presente tesis se plantea la metodología para el análisis de riesgo hidrometeorológico en la actividad portuaria y su aplicación para el puerto de Barranquilla, delimitado desde la desembocadura (K0) hasta el Puente Pumarejo (K22). La metodología a través del análisis probabilístico de las variables de interés (profundidad del canal, velocidad de la corriente, viento y oleaje), permitió la generación de curvas de frecuencia y vulnerabilidad para la estimación de escenarios de riesgo espaciales y temporales a nivel mensual en el área de estudio.

## 1 INTRODUCCIÓN

El transporte de mercancía y personas a través de embarcaciones por rutas marítimas o fluviales representa cerca del 90% del total mundial, siendo éste el medio de transporte por excelencia para el comercio internacional. Esta actividad, debido a su importancia, ha sido estudiada y evaluada en términos de seguridad a nivel internacional por diferentes organizaciones como la Organización Marítima Internacional (2018), PIANC (2014) entre otras, en búsqueda de metodologías que analicen todas las variables que influyen en la navegación de embarcaciones. Los modelos de riesgo buscan estructurar una metodología que permita planificar la actividad portuaria y mejorar la seguridad marítima y fluvial, incluida la protección de la vida, la integridad de las embarcaciones, el medio ambiente y la infraestructura. A pesar de que es una herramienta necesaria dentro de la actividad portuaria, en Colombia no se tienen herramientas estructuradas para este tipo de análisis de riesgo.

En el contexto del sector de estudio, el puerto de Barranquilla es el segundo a nivel de volumen de carga granel solido diferente al carbón en Colombia, y es el puerto multipropósito más importante de la región Caribe colombiana (Patiño, 2018; SuperTransporte, 2020). Con cierta frecuencia, en el sector portuario de Barranquilla se han registrado restricciones de acceso para las embarcaciones; la alta sedimentación del río, los forzamientos ambientales que afectan a las embarcaciones, sumado a la falta de seguimiento y modelación de las condiciones hidrodinámicas y morfológicas del río han derivado en problemas de operatividad en la actividad portuaria de la ciudad. En el periodo enero 2018 a junio 2020, un total de 83 embarcaciones tuvieron que ser desviados hacia puertos cercanos, ya que las condiciones en el canal navegable no fueron óptimas para el tránsito de embarcaciones (Asoportuaria, 2020). Este problema se ve representado principalmente en pérdidas económicas para los puertos y las navieras.

La presente tesis de investigación tiene como objetivo realizar un análisis de riesgo asociado a la navegación en el canal navegable del río Magdalena desde su desembocadura en Bocas de Ceniza (K0) hasta puente Pumarejo (K21+850), tramo donde se ubican los principales puertos de la ciudad

de Barranquilla. Este análisis está orientado a cuantificar el riesgo solamente bajo parámetros hidrometeorológicos enfocado principalmente en profundidad, caudales y velocidad del río, viento y oleaje, descartando factores como el error humano o la actividad logística inherente a la actividad portuaria. El riesgo se estimó teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia de variables hidrometeorológicas medidas de la zona de interés y la vulnerabilidad de la embarcación frente a los forzamientos, junto con la modelación hidrodinámica del río en iRIC (Mflow02) para estimar las velocidades del flujo en el canal navegable bajo ciertos escenarios. Este proceso es necesario para relacionarlo con la geometría, características y condiciones mínimas de navegación de las embarcaciones que llegan al sector portuario de la ciudad y poder definir la probabilidad de cierta embarcación pueda movilizarse o no por el canal navegable para los escenarios mensuales esperados.

Los resultados del modelo de riesgo permitieron determinar estadísticamente los mejores meses para la actividad portuaria en Barranquilla; de igual forma, la cuantificación del riesgo permitió determinar cuáles son las variables que más comprometen la actividad portuaria a lo largo del año y del canal navegable, al ser una herramienta tanto temporal como espacial. El modelo de análisis de riesgo es un insumo para futuros modelos de gestión y manejo del riesgo para la mitigación y reducción de la incidencia de estos factores, los cuales requieren de un trabajo adicional e interdisciplinar con los diferentes actores del puerto para la integración de un modelo completo para el puerto en el futuro.

El presente documento de tesis se encuentra dividido en 8 capítulos, en los Capítulos 1 y 2 se presenta las temáticas introductorias a la problemática de navegación en el puerto de Barranquilla, la justificación de investigación en el tema y los objetivos desarrollados a lo largo de la investigación, junto con las limitaciones presentadas durante el proceso y los alcances del producto final desarrollado. En el Capítulo 3 se describe el estado del arte, haciendo énfasis en las metodologías actuales para la cuantificación del riesgo y la identificación de las variables de análisis más representativas en el contexto de navegación. En el Capítulo 4 se detalla el marco teórico en el cual se sustenta el desarrollo metodológico y los resultados; en este capítulo se presenta una descripción sobre la embarcación como elemento de análisis frente a las condiciones hidrometeorológicas, al igual que la base matemática del modelo hidrodinámico utilizado. Se describen los cálculos estadísticos relevantes realizados y el modelo estadístico de geometría hidráulica para la caracterización hidromorfológica del canal navegable. En el Capítulo 5 se presenta la metodología de análisis para el análisis de riesgo a la navegación describiendo las variables de análisis consideradas y el procedimiento desarrollado. El Capítulo 6 presenta la caracterización del sector de estudio y de la embarcación de análisis, adicionalmente se detallan los resultados de la caracterización estadística de variables y la modelación hidrodinámica del río, continuando posteriormente con el Capítulo 7 con los resultados del modelo de riesgo mensuales para el sector portuario de la ciudad de Barranquilla. El documento de tesis finaliza con las conclusiones de la investigación realizada en el Capítulo 8.



## 1.1 Planteamiento del problema

El transporte de carga a través de rutas marítimas y fluviales ha sido un tema de gran relevancia para el gobierno colombiano. Se ha buscado aumentar la capacidad de importaciones y exportaciones a través de los puertos marítimos ubicados a lo largo de la costa Caribe y Pacífica del país y asegurar las condiciones de las arterias fluviales para asegurar la navegabilidad para que el sector sea más competitivo frente a los otros modos de transporte que se tienen en el país. Se ha identificado que existen limitaciones en transporte marítimo y fluvial principalmente en el estado de las vías de conexión con puertos, muelles y embarcaderos en el país. Escenarios propuestos en el Plan Maestro Fluvial (PMF) (MinTransporte, 2015) prevén para el 2035 un transporte fluvial de carga de entre 4.7 a 19.5 millones de toneladas/año, es decir, un aumento de 1.5 a 5 veces el volumen de carga actual a través de transporte fluvial, sumado a las proyecciones en importaciones y exportaciones de carga marítima para los puertos del Caribe colombiano y que con una correcta planeación y el mantenimiento del canal navegable permitiría un aumento significativo para el puerto de Barranquilla.

El sector portuario del país ha mostrado que necesita mejores prácticas y una normatividad más rigurosa para la definición de obras hidráulicas, el tráfico y seguridad náutica. Dentro del PMF se establece que para cumplir con los escenarios a futuro se deben realizar acciones que incluyan toda aquella intervención a infraestructura tanto de muelles, como de puertos concesionados, equipos, vías de acceso a los muelles y el monitoreo de canales navegables. Este último aspecto es de suma relevancia, ya que la información sobre muchas de las vías navegables y canales de acceso del país es escasa, no se cuenta con herramientas de gestión de la información y se suma la problemática de la poca periodicidad de actualización de datos. La navegación fluvial en Colombia se ha desarrollado en gran parte sobre el río Magdalena desde Puerto Salgar y Barrancabermeja hasta su desembocadura en el mar Caribe en Bocas de Ceniza y por el sector del Canal del Dique. Por su parte, la navegación marítima en el Caribe colombiano se concentra mayormente en los puertos de Cartagena y Santa Marta principalmente, por tener una mayor infraestructura portuaria dedicada al transporte y almacenamiento de contenedores y graneles secos (Otero, 2012). En estos puertos en los cuales las restricciones por profundidad son pocas y permiten el ingreso de embarcaciones de hasta 60 pies de calado, lo que le resta competitividad al puerto de Barranquilla en el cual las embarcaciones que ingresan y zarpan tienen alrededor de 10 m de calado (Alza & Ramirez, 2018).

Particularmente, el sector del puerto de Barranquilla (K0+000 hasta K22+000) ha recibido mayor atención y disposición por parte de entidades locales y nacionales para asegurar la navegabilidad en esta zona debido a la importancia económica que representa para la ciudad y la región. Uno de principales problemas que presenta el río es la sedimentación que afecta la profundidad, y se aprecia recurrentemente en el puerto de Barranquilla donde se presentan restricciones en el ingreso y salida de buques debido a la reducción del calado autorizado, lo cual afecta directamente la operación del puerto. Estas situaciones conllevan a realizar campañas de dragado y mantenimiento permanente en las zonas donde es navegable y de obras hidráulicas en los sectores más críticos, las cuales se ejecutan cuando las condiciones de navegabilidad son mínimas y se requiere declarar urgencia manifiesta para la inmediata adecuación de las condiciones del río. A pesar de que el dragado es la solución a corto plazo para permitir la navegación ya que permite atender eventos puntuales, no lo es a largo plazo.

Restrepo (2005) comenta: *“el dragado no será suficiente porque los sedimentos seguirán en aumento esto, en vez de bajar costos en la economía, los aumentaría por lo costoso que resulta realizar el dragado”*, por lo cual la predicción de la profundidad del río se hace más importante para definir campañas dragado de dragado y permitiría una mejor planificación de la actividad portuario en la zona mientras se encuentran otras soluciones a la problemática del calado operativo.

Para el año 2020 se presentaba una reducción en el primer semestre del 0.5% en la cantidad de toneladas de carga movilizadas respecto al mismo periodo año anterior pasando de 5'362.3535 toneladas a 3'336.655 toneladas, para el primer semestre del periodo 2019 a 2018 la reducción se presentaba en el 9.4% el reporte anual 2019 mostraba una variación anual del -2% (SuperTransporte, 2020). Según el consolidado de Asoportuaria (2020) para el 2018 se reportaron 35 embarcaciones desviadas (230.316 toneladas aligeradas), en 2019 un total de 36 embarcaciones (169.885 toneladas aligeradas) y para el primer semestre de 2020 las condiciones de acceso al puerto generaron el desvío de 12 embarcaciones (82451.5 toneladas aligeradas). Las dificultades que se tienen en el ingreso de las embarcaciones generan sobrecostos por distancias mayores en los recorridos hacia los puertos cercanos, pérdidas para el puerto y las navieras, reducción en la llegada de mercancía que requiere la ciudad y la inestabilidad laboral generada por los más de 13,000 empleos directos e indirectos que genera el puerto de Barranquilla (Narváez, 2018). Las restricciones ambientales en el puerto se manifiestan incluso dentro de la actividad de dragado que se desarrolla en el puerto, ya que en ciertos meses los forzamientos, tanto climáticos como hidrodinámicos en el sector, imposibilitan la operación de las dragas que llegan al puerto para el mantenimiento del canal navegable.

Aunque se han planteado varias soluciones para esta problemática en el puerto de Barranquilla, se ha encontrado que no existe un proceso de seguimiento en las condiciones del río para el modelamiento exhaustivo del mismo, con el fin de tomar decisiones acertadas sobre las obras y la realización de dragados programados específicos en zonas que lo requieran, al igual que se requiere de la predicción de las condiciones del río para ciertos escenarios buscando la determinación de condiciones probables, con el fin de apoyar las operaciones logísticas que se desarrollan en el puerto en pro de reducir las pérdidas económicas que se generan por ciertas falencias de planeación predictiva y eventuales situaciones de restricción en el canal navegable desde Bocas de Ceniza hasta el puerto de la ciudad.

## 1.2 Justificación

La problemática de navegación en el río Magdalena asociada a la variabilidad en los parámetros hidrometeorológicos que pueden afectar la actividad portuaria, sumado a mayores retos de tipo predictivo para la planeación en la operación de los barcos ha logrado que se muestre más interés hacia el estudio del comportamiento hidrodinámico y morfológico del río, y la caracterización de clima costero para diferentes épocas del año y así definir los mejores períodos del año para el acceso de embarcaciones. Con el fin de evaluar la viabilidad de navegación en el río, sumado a las problemáticas mencionadas, en el PNF se establecen estrategias para mejorar la operación y viabilidad del transporte fluvial, dentro de las cuales se mencionan principalmente:

- Fortalecer la posición competitiva del transporte fluvial a través de la reducción de los costos operacionales y la mejora del rendimiento operacional.
- Proveer información de gestión de tráfico.
- Seguimiento de buques y su carga, en especial las cargas peligrosas.
- Mejoramiento de los sistemas de reducción de catástrofes y de respuesta de emergencia.
- Sistema unificado de inspección y monitoreo de las condiciones del río.
- Establecer un sistema básico de análisis de riesgo.
- Proveer a los operadores con información de tiempo real sobre condiciones de las vías navegables, a través de la implementación de módulos de Servicios de Información Fluvial (SIF).
- Remover las limitaciones para habilitar la navegación 24/7.

Para que sea viable y competitiva la operatividad del puerto Barranquilla se deben entender las características que influyen directamente en la navegabilidad. Se muestra entonces la necesidad de realizar acciones en pro del mejoramiento y monitoreo de las actividades de navegación en el río Magdalena debido a su importancia a nivel regional y nacional. Se busca por lo tanto, la realización de acciones encaminadas a predicción y modelamiento de las condiciones del río para ciertos escenarios conocidos y de los cuales se conoce su periodicidad a través de análisis de la información disponible como registros de caudales, niveles, oleaje, viento y marea, al igual que levantamientos batimétricos. Todo esto con el fin de realizar estimaciones de la probabilidad asociada a la navegación en ciertos tramos del río para las diferentes embarcaciones que llegan al puerto de Barranquilla. Estas estimaciones permitirían una planeación logística del puerto minimizando las pérdidas asociadas al aligeramiento de buques en los puertos de Santa Marta o Cartagena debido a restricciones de ingreso conociendo cuales embarcaciones pueden hacer ingreso para ciertas fechas, estas predicciones servirán además para identificar zonas del río que necesitarían intervención especial y predecir cuándo sería necesaria la realización de estas obras de contingencia.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo general

- Desarrollar un modelo simplificado para el análisis de riesgo hidrometeorológico de la navegación de embarcaciones marítimas hacia aguas interiores considerando como caso de estudio el sector portuario de Barranquilla en el río Magdalena.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las variables hidrometeorológicas de mayor relevancia para la navegación a través de análisis estadístico de frecuencias en el sector de estudio.
- Caracterizar los parámetros mínimos de navegación y su relación con las variables hidromorfológicas para la generación de curvas de vulnerabilidad para la embarcación de referencia que se maneja en el sector de estudio.
- Evaluar la caracterización probabilística de las variables de análisis y curvas de vulnerabilidad para la generación del modelo de riesgo a la navegación.

## 1.4 Alcances y limitaciones

La presente investigación está asociada a la navegación en el canal navegable del sector de estudio delimitado desde la desembocadura del Río Magdalena en el K0+000 hasta el K21+825, con abscisado y geometría (radios de curvatura, profundidad y ancho) definidos por Cormagdalena dentro de las licitaciones de dragado de mantenimiento del canal (Findeter & Cormagdalena, 2020). Se consideró la embarcación de referencia SUPRAMAX, a pesar de que la arquitectura naval de estos buques tiene diferentes dimensiones, se toma de referencia un buque de eslora de 190 metros, manga de 32.2 metros y calado en agua salada de 11.6 metros. El modelo de riesgo planteado no tiene en cuenta la influencia del ancho y radios de curvatura definidos por Cormagdalena en el movimiento de la embarcación.

Se usaron modelos computacionales que representasen los fenómenos que ocurren sobre el Río Magdalena en función del régimen hidrológico principalmente, por lo tanto, las limitaciones y suposiciones en los modelos marcaran la relatividad de los resultados obtenidos. Las herramientas computacionales usadas para modelación no tienen en cuenta los fenómenos de propagación de oleaje hacia aguas someras ni los procesos de dinámica costera. La aplicación de modelos de para estas variables están pensadas para trabajos futuros.

Cabe resaltar que los resultados del modelo de riesgo pertenecen a un ejercicio académico y no deben ser utilizados como referencia para contratación ni como única herramienta proyectar el tráfico portuario en la zona bajo escenarios de riesgo. El modelo generado requiere de la integración de múltiples áreas del conocimiento para la generación de un modelo holístico que permita abordar la seguridad náutica para la toma decisiones desde la planificación portuaria y la determinación de obras de ingeniería para mitigar las consecuencias.

## 2 ESTADO DEL ARTE

El concepto de Riesgo tiene múltiples definiciones según el área de estudio. Desde la perspectiva de la seguridad, el riesgo es la descripción de la gravedad de los peligros para el sujeto analizado, que se refiere principalmente como la posibilidad de la ocurrencia de accidentes peligrosos, incidentes anormales o condiciones adversas y la consecuencia de los daños resultantes de un accidente. (Hu et al., 2007). Andrews & Moss (2002) definen el riesgo (R) como la pérdida esperada definida cuantitativamente como el producto probabilidad de ocurrencia (P) de un evento no deseado (explosión, derrame, etc.) y las consecuencias del incidente específico al ambiente o a la población (C):

$$R = P \times C$$

(1)

Warner (1992) presenta una definición similar planteando que el riesgo es la combinación de la probabilidad, frecuencia u ocurrencia de un peligro definido y la magnitud de sus consecuencias si llega a ocurrir. Tal como se observa, las definiciones planteadas son generales y requieren que sean aplicadas a un contexto específico, dentro del contexto de navegación la Organización Marítima Internacional (1998) define al riesgo, dentro de su glosario de términos náuticos, como la combinación de la frecuencia de un evento catalogado como peligroso para la navegación y la vulnerabilidad de sus consecuencias para la embarcación, infraestructura portuario o el personal presente.

Entender el riesgo global requiere de un conjunto de etapas iniciando en la evaluación, luego el análisis y finalmente el manejo del riesgo. La etapa de análisis es un proceso sistemático en el que se usa la información disponible para determinar la frecuencia con la que pueden ocurrir varios incidentes, así como la magnitud de sus consecuencias. Se decide si dicho riesgo es aceptable sin ninguna acción o si se deben tomar medidas de mitigación para reducir el riesgo a niveles aceptables. El análisis de riesgos implica identificar los potenciales incidentes, calcular la frecuencia y consecuencias de los incidentes, calcular el riesgo de casos analizados y calcular el riesgo acumulado de todos los casos que podrían ocurrir en un intervalo de tiempo y establecer un criterio de evaluación para definir si un riesgo es aceptable o no (PIANC, 2014).

Existen múltiples clasificaciones de riesgo según sus atributos, algunos ejemplos aplicados a la ingeniería son:

- Riesgos locales versus riesgos no localizados.
- Riesgos en caso de un evento (riesgo condicional) en un intervalo de tiempo.
- Riesgo estimado semi-cuantitativamente versus riesgo estimado computacionalmente.
- Riesgo estimado estadísticamente bajo registros históricos versus riesgo estimado por modelos.
- Por fuente del riesgo: técnico, natural, operativo.

Häring (2016) menciona que el esquema más utilizado para el análisis, procesamiento y manejo del riesgo es el esquema de los 5 pasos, donde cada uno se encuentra conectado por una serie de pasos para el monitoreo del escenario planteado:

1. Establecer el contexto de análisis, definiendo la situación inicial, identificando los peligros dependiendo de las condiciones de análisis y modelación, implica describir cómo afecta el peligro al modelo.
2. Analizar/computar el riesgo, calculando las probabilidades y consecuencias de los eventos dadas las variables analizadas.
3. Evaluar/jerarquizar/priorizar el riesgo, juzgando si el resultado anterior es aceptable o no, esto puede llevar a comparar los niveles de riesgo para generar un criterio de comparación y llevarlo a un costo-beneficio.
4. Tratar/reducir el riesgo.
5. Manejar el riesgo.

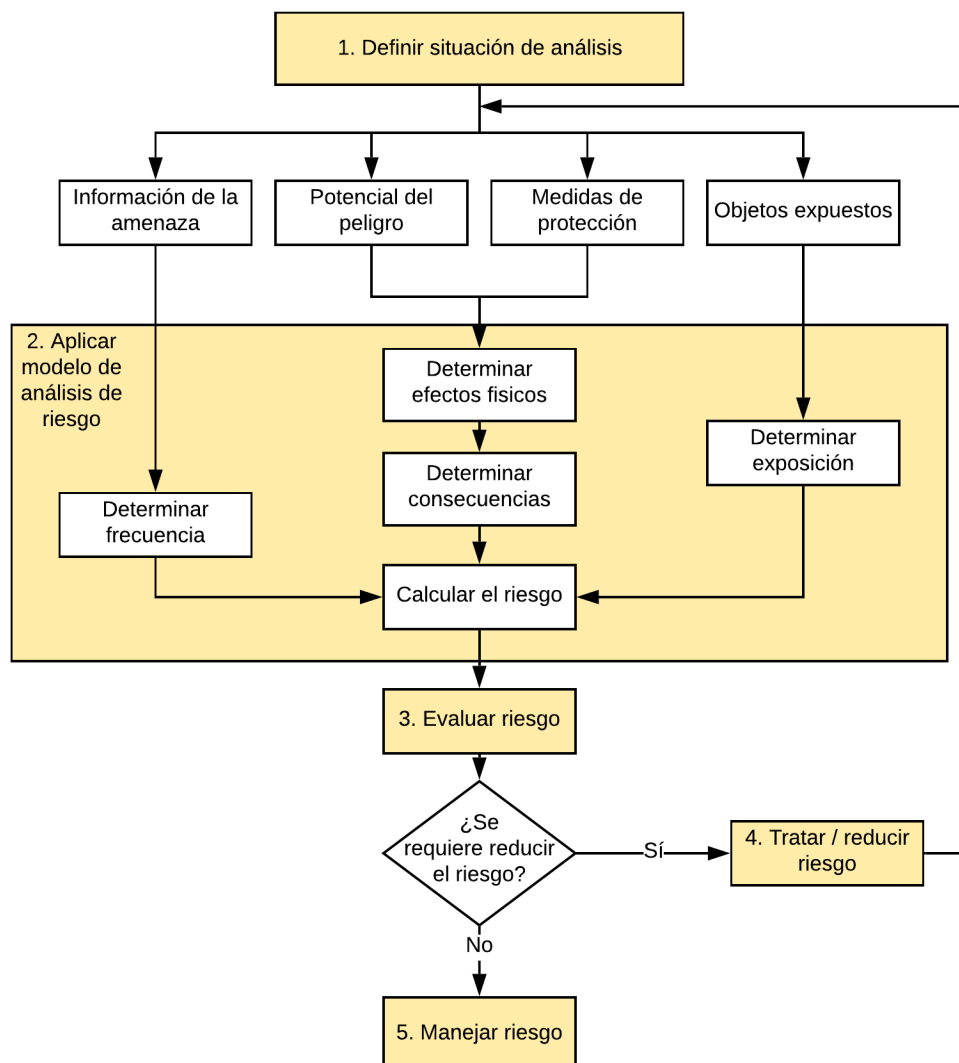


Figura 2-1. Ejemplo de esquema de análisis del riesgo. (Häring, 2016)

Asegurar la navegabilidad en vías fluviales y en canales de acceso es esencial para la programación de las actividades portuarias. La fiabilidad de la estimación del riesgo radica en el conocimiento de la frecuencia con que puede ocurrir un determinado tipo de incidente, esta información muchas veces es escasa o nula según sea el control de tráfico portuario. Los incidentes se definen como un evento anormal o que no resulta del control de una embarcación bajo condiciones normales de operación. Los incidentes pueden ser causados por fallos en la embarcación del motor, timón, mal funcionamiento de remolcadores, rotura de cables de remolque o amarre, etc.; los incidentes también pueden ocurrir por condiciones ambientales extremas. Históricamente la Organización Marítima Internacional (2020) ha trabajado en el desarrollo de herramientas que permitan garantizar que se tomen medidas antes de que ocurra un desastre. Esta herramienta llamada Evaluación Formal de Seguridad -FSA por sus siglas en inglés- se define como un proceso racional y sistemático para evaluar los riesgos asociados con la actividad de navegación y para evaluar los costos y beneficios buscando determinar cuáles son las opciones más factibles para reducir estos riesgos. La FSA es una metodología estructurada y sistemática, destinada a mejorar la seguridad marítima, incluida la protección de la vida, la salud, el medio marino y la propiedad, mediante el uso de análisis de riesgos y evaluación de costos y beneficios. La FSA consta de cinco pasos:

1. Identificación de riesgos (una lista de todos los escenarios de accidentes relevantes con posibles causas y resultados).
2. Evaluación de riesgos (evaluación de factores de riesgo)
3. Opciones de control de riesgos (diseño de medidas regulatorias para controlar y reducir los riesgos identificados).
4. Evaluación de costo-beneficio (determinación de la rentabilidad de cada opción de control de riesgos).
5. Recomendaciones para la toma de decisiones (se proporciona información sobre los peligros, sus riesgos asociados y la rentabilidad de las alternativas de control de riesgos).

En el documento *Guidelines for Formal Safety Assessment* (Organización Marítima Internacional, 2018) se contempla que el propósito del análisis de riesgos es una investigación de las causas, los eventos iniciadores y las consecuencias de los escenarios de accidentes más importantes identificados. Esto se puede lograr mediante el uso de técnicas adecuadas que modelen el riesgo, permitiendo así, centrar la atención en áreas de alto peligro e identificar y evaluar los factores que influyen en el nivel de riesgo. S. Li, Meng, & Qu, (2012) mencionan la necesidad de integrar dentro del análisis de riesgo la frecuencia de eventos (redes bayesianas, estimaciones de colisiones, árbol de eventos, etc.) respecto a la respuesta de la embarcación (árbol de fallas, simulaciones, modelos mecánicos, etc.) para estimar el riesgo al que están expuestas embarcaciones en aguas confinadas como trabajo por ser complementado a los modelos ya desarrollados.

## 2.1 Herramientas usadas para la generación de modelos de riesgo

La revisión literaria muestra que existen diferentes metodologías para calcular el riesgo en función de la información cuantitativa y cualitativa disponible, registros históricos, procesos y reglas de



cálculo. Se listan y se describen a continuación las principales metodologías usadas a nivel mundial para el cálculo del riesgo en navegación.

#### 2.1.1 Análisis de árbol de fallas y árbol de eventos

El árbol de fallas es un diagrama lógico que muestra la relación entre los eventos que, por separado o en combinación, se producen para causar la ocurrencia de un evento de nivel superior o inferior si se trata desde una perspectiva inductiva o deductiva respectivamente (Andrews & Moss, 2002). Se utiliza en el análisis del árbol de fallas para determinar la probabilidad de un acontecimiento de primer nivel, que puede ser un tipo de accidente o un resultado peligroso no intencionado. El análisis del árbol de fallas puede tener en cuenta las fallas de causa común en sistemas con elementos redundantes o en espera además, que pueden incluir eventos de falla o causas relacionadas con factores humanos. El desarrollo de un árbol de fallas se hace mediante un enfoque de arriba hacia abajo, sistemáticamente considerando las causas o eventos a niveles inferiores al nivel superior. Si dos o más eventos inferiores deben ocurrir para causar el siguiente evento superior, esto se muestra por una puerta lógica "y". Si alguno de los dos o más eventos inferiores puede causar el siguiente evento superior, esto se muestra mediante una puerta "o" lógica. Las puertas lógicas determinan la suma o multiplicación de probabilidades para obtener los valores para el evento más importante. Según Pietrzykowski (2007) el método del árbol de fallas es uno de los métodos de análisis del sistema más utilizados. El desarrollo y análisis de un árbol de fallas para el proceso del tráfico de embarcaciones se basa en información sobre el proceso, el equipo y el factor humano.

Al igual que el árbol de falla, el árbol de eventos es un diagrama lógico que se utiliza para analizar los efectos de un accidente, un fallo o un evento no intencionado. El diagrama muestra la probabilidad o frecuencia del accidente vinculada a las medidas de salvaguardia que deben adoptarse después de que ocurra el evento para mitigar o prevenir la escalada. Se analizan las probabilidades de éxito o fracaso de esas medidas (Raiyan et al., 2017). Las trayectorias de éxito y fracaso conducen a diversas consecuencias de diferente gravedad o magnitud. Multiplicando la probabilidad del accidente por las probabilidades de éxito o fracaso en cada vía se obtiene la probabilidad de cada consecuencia.

#### 2.1.2 Análisis a través de lógica difusa

La lógica difusa es una extensión de la lógica booleana clásica, este método permite generar cadenas lógicas teniendo en cuenta la incertidumbre de cada una de las variables. Dentro de la lógica difusa existen diferentes reglas o técnicas definidas por el usuario para definir la conectividad entre las variables. (B. Li, 2018). Los elementos analizados dentro del esquema por lo general tienen un valor cuantitativo al cual se le asigna una clasificación cualitativa (de Excelente a Pésimo en función de su probabilidad o vulnerabilidad) a través de la regla definida. El resultado permite categorizar el resultado con un rango de valores en orden de jerarquizar o ponderar  $n$  escenarios en términos de los niveles de seguridad náutica (Zhang et al., 2016). El análisis a través de lógica difusa en conjunto con redes neuronales y entrenamiento de redes también ha sido probado como una herramienta para la evaluación de escenarios de riesgo con sus respectivas contramedidas para el mejoramiento de la seguridad portuaria (Wang et al., 2019).



### 2.1.3 Estudios de peligro y operatividad (HAZOP) y Análisis What-If

Los estudios de peligro y operatividad *-HAZOP en inglés-* se llevan a cabo para analizar los peligros de un sistema en las fases progresivas de su desarrollo desde el concepto hasta la operación. El objetivo es eliminar o reducir al mínimo los posibles peligros (Kuo, 1998). Se constituyen formalmente equipos de analistas de seguridad y especialistas en el sistema en cuestión, como diseñadores, constructores y operadores. Por lo general se requiere un grupo de 7 a 10 personas. Se utilizan dibujos, descripciones técnicas, etc., y es posible que los expertos tengan que aclararse mutuamente cómo funcionan y pueden fallar los detalles del sistema, la función o el funcionamiento. Los miembros del equipo pueden cambiar en fases sucesivas en función de los conocimientos técnicos necesarios. Al examinar los diseños consideran sistemáticamente las desviaciones de las funciones previstas, examinando las causas y los efectos. Se registran las conclusiones y recomendaciones y las medidas de seguimiento necesarias. En el documento técnico *Ports and Waterways Safety Assessment Workshop Guide* (U.S. Department of Homeland Security, 2010) se muestra el uso de esta metodología para el análisis de riesgo en diferentes puertos en Estados Unidos como en Tampa, Miami o Nueva York; la implementación de este esquema de análisis requiere de una selección de expertos de múltiples áreas del conocimiento buscando una aproximación multidisciplinaria para la estimación de los niveles de riesgo (Team Expertise Cross-Assessment).

La técnica de análisis "What If Analysis" parte de la pregunta "¿qué pasaría si?", las preguntas abarcan temas como errores de operación, errores de medición, mal funcionamiento de los equipos, mantenimiento, fallo de los servicios públicos, pérdida de contención, operación de emergencia e influencias externas (Nowakowski, Lukasik, & Wojciechowski, 2017). Se puede utilizar la experiencia de accidentes anteriores para comprobar si están completas. Los peligros se consideran en secuencia y se estructuran en una secuencia lógica, en particular para permitir la referencia cruzada entre los peligros. Este difiere del método HAZOP principalmente en que la generación de preguntas permite detallar en temas puntuales y llegar a conclusiones mucho más rápido, además, puede ser complemento de otros métodos de cuantificación del riesgo más cuantitativos pero se requiere de conocer el tema de análisis con anterioridad para la formulación de preguntas específicas (Card, Ward, & Clarkson, 2012).

### 2.1.4 Redes Bayesianas

Una red bayesiana es un modelo gráfico probabilístico que representa un conjunto de variables aleatorias y sus dependencias condicionales mediante un gráfico acíclico dirigido. Las redes bayesianas se han utilizado con éxito para desarrollar modelos para aplicaciones prácticas en áreas de toma inteligente de decisiones, evaluación de seguridad, diagnóstico médico, reconocimiento de patrones y diagnóstico de redes informáticas. Dado que la mayoría de los problemas de la vida real implican inherentemente incertidumbre causada por datos incompletos y/o limitación en la interpretación completa de un proceso o fenómeno las redes bayesianas proporcionan un enfoque útil con aplicaciones en diferentes campos de estudio incluido la determinación del riesgo a la navegación. (Zhang et al., 2013). La implementación de un sistema de redes bayesiana ha sido ampliamente utilizada para el análisis de múltiples variables independientes que podrían llegar a ser representativas

dentro de un análisis de riesgo integral a la navegación. realizaron un análisis de riesgo teniendo en cuenta el factor humano, la embarcación de referencia, factores ambientales y manejo portuario (X. Zhang et al., 2019).

## 2.2 Identificación de variables representativas para análisis de riesgo a la navegación

El análisis de riesgo a la navegación puede atenderse ser a través de diferentes factores de análisis, la definición de los criterios depende del sector de estudio, alcance, del tipo de análisis que se quiere realizar y que dependen altamente de las condiciones del mar y del río, y otros factores no naturales. Todo el análisis de las variables relevantes dentro de los análisis de riesgo e incertidumbre asociado a la navegabilidad en canales están relacionados con los registros históricos climáticos y sucesos extraordinarios (daños por oleaje o viento, colisiones, contactos, encallamientos, etc.). (S. Li et al., 2012)

Se han realizado estudios para determinar cuáles son los criterios más importantes por evaluar en la identificación de los peligros para la estimación del riesgo asociado a la navegación; estos parámetros son los que requieren especial atención, aunque varían dependiendo de las características del canal navegable. Paulauskas (2006) plantea la evaluación del riesgo en el este del mar Báltico según criterios como:

- Condiciones geográficas: se evalúa la existencia de obstáculos o eventos que puedan afectar la navegabilidad, se considera dentro de este análisis.
- Distancias entre el punto de acceso hasta el puerto.
- Configuración del puerto de entrada.
- Deficientes condiciones de profundidad en algunos sectores.
- Condiciones hidroclimáticas actuales.
- Condiciones de tráfico: se relaciona directamente con las características del tráfico que recibe el canal navegable.
- Densidad de tráfico.
- Separación del tráfico.
- Obstáculos no naturales.
- Embarcaciones: se relaciona con el estado físico y las características de las embarcaciones:
- Tonelaje.
- Calado.
- Maniobrabilidad.
- Estabilidad.
- Riesgo de encallamiento.
- Otras (factores humanos y logísticos).

En ríos del continente asiático de alta confluencia de tráfico y de características particulares como alta sedimentación o condiciones climáticas adversas persistentes, se ha identificado otro esquema de similares características al anterior, para la evaluación del riesgo asociado a la navegación por estas vías navegables, Yan & Zhang (2014) y Zhang et al. (2016) realizaron la evaluación en el río Yangtze y definieron los siguientes criterios (Tabla 2-1):

- Factores humanos: todos aquellos relacionados a la actuación o preparación de la tripulación y personal en tierra.
- Factores ambientales: relacionados con las condiciones naturales y de navegación por el cauce.
- Embarcación: se deben tener en cuenta características de las embarcaciones que navegan por el canal.
- Manejo portuario: se enmarca a las autoridades portuarias y sus normativas a la operación de embarcaciones, y los propietarios de estas.

*Tabla 2-1. Categorización de principales factores de riesgo en navegación. (Zhang et al., 2016)*

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Humano (0.43)	Cualificación (0.37)	
	Experiencia (0.15)	
	Conciencia de seguridad (0.48)	
Embarcación (0.21)	Edad (0.30)	
	Tonelaje (0.29)	
	Maniobrabilidad (0.41)	
Ambiental (0.24)	Natural (0.31)	Visibilidad (0.45)
		Viento (0.34)
		Corrientes (0.21)
	Navegación (0.69)	Dimensión del canal (0.65)
		Volumen de tráfico (0.09)
		Ayudas a la navegación (0.26)
Manejo portuario (0.12)	Autoridad portuaria (0.48)	
	Propietarios (0.52)	

Pietrzykowski (2007) menciona que los principales factores a evaluar dentro de un esquema de riesgo portuario se encuentran:

- Caracterización del área de estudio.
- Determinación y caracterización del número de colisiones registradas.
- Estado de las embarcaciones.
- Condiciones hidrológicas y meteorológicas.
- Análisis de las conductas de los navegantes para determinar la importancia del factor humano en los incidentes registrados.

A través de la identificación de parámetros relevantes se le asigna una ponderación de acuerdo con la importancia y el impacto de sucesos ocurridos, esto conlleva a que cada río, canal navegable o sector de estudio debe tener un análisis específico considerando sus características propias del sistema.

### 3 MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Embarcaciones

El barco, buque o embarcación es el vehículo utilizado para el transporte marítimo o fluvial de personas y mercancía de un punto inicial a un punto final; las embarcaciones son naves de tamaño, solidez y fuerza apropiada para resistir la navegación y asegurar la integridad de lo que se transporta (Dirección General de Puertos, 2008a). Las embarcaciones que arriban a los diferentes puertos dependen altamente de la infraestructura instalada y las condiciones naturales del puerto. De acuerdo con el servicio que prestan las embarcaciones se pueden clasificar según los criterios de la Tabla 3-1.

*Tabla 3-1. Tipos de embarcaciones según carga transportada. (Dirección General de Puertos, 2008a)*

Barco	Tipo	Sub-tipos
Mercantes	Cargueros	Carga unitaria
		Carga general
	Portacontenedores	
	Petroleros	
	Graneleros	Cereales (bulk carrier)
		Minerales (ore carrier)
	Transbordo por rodadura	
	Transbordo por flotación	
Pasajeros	Otros	
	Cruceros	
	Trasatlánticos	
	Transbordadores	
Pesqueros	Barcos pesqueros	

Uno de los factores importantes a considerar es el movimiento de la embarcación, la cual se mueve según seis grados de libertad, tres movimientos de traslación y tres de rotación y las variables físicas que pueden afectar el desplazamiento como:

- Fuerzas hidrodinámicas actuando sobre el casco de la embarcación debido a la velocidad y aceleración de la embarcación.
- Reacciones inerciales debido a la aceleración.
- Forzamientos ambientales debido al viento, oleaje y corrientes.
- Fuerzas externas aplicadas como remolcadores

La acción de estas fuerzas da origen a seis movimientos principales, tres angulares (cabeceo, balanceo y guiñada) y tres lineales (arfada, vaivén y deriva) (Figura 3-1), los cuales deben ser tomados en cuenta para el análisis de los factores que influyen en la navegación de las embarcaciones (Dirección General de Puertos, 2008b).

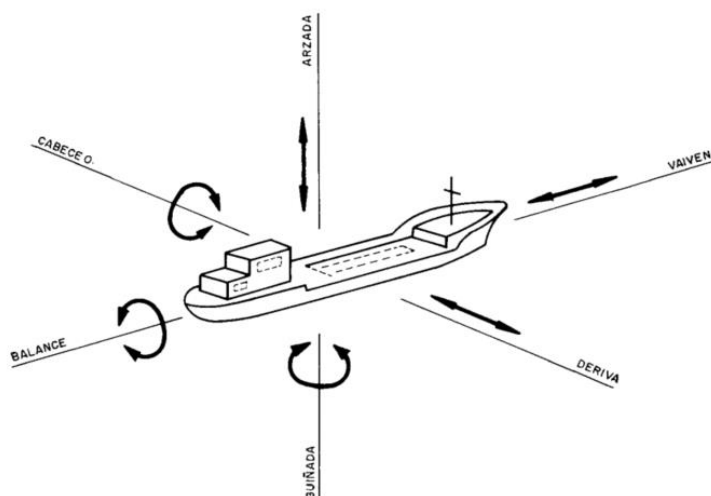


Figura 3-1. Movimientos de un buque. (Dirección General de Puertos, 2008b)

El viento, el oleaje y el cambio de densidad del agua son los factores más significativos para el análisis de riesgo debido a forzamientos hidrometeorológicos. A continuación, se detallan los principales forzamientos.

### 3.1.1 Incidencia del viento

Paulauskas, Paulauskas, & Wijffels (2009) hacen relación a la afectación del viento a puertos abiertos y a embarcaciones en aproximación, lo que podría causar problemas de estabilidad, maniobrabilidad y restringe un atraque seguro principalmente generando una condición de deriva. Xiong & Wang (2019) mencionan que cuando la dirección del viento no está en la misma línea con las líneas de proa y popa del barco, este genera un desvío en el curso de la embarcación en función del ángulo generado, siendo máximo cuando el viento es perpendicular al rumbo, los vientos cruzados afectan a las embarcaciones a todas las velocidades, pero tienen mayor efecto a bajas velocidades.

El movimiento requerido para compensar la deriva aumenta el ancho requerido para maniobrar. Las guías internacionales de diseño de canales navegables (OCDI, 2007; PIANC, 2014; Puertos del Estado, 2018) tienen dentro de sus lineamientos para el dimensionamiento del canal la acción de viento sobre las embarcaciones a partir de la velocidad. El viento categoriza según la escala de Beaufort (Tabla 3-2) en función de la velocidad predominante a una altura de referencia de 10 metros sobre la superficie en mar o campo abierto (Puertos del Estado, 1995).

Tabla 3-2. Escala de Beaufort de velocidad del viento. (Puertos del Estado, 1995)

Número de Beaufort	Velocidad del viento (m/s)	Nudos (millas náuticas/h)	Denominación
0	<0.3	< 1	Calma
1	0.3 – 1.5	1 a 3	Ventolina
2	1.6 – 3.3	4 a 6	Flojito (Brisa muy débil)
3	3.4 – 5.4	7 a 10	Flojo (Brisa Ligera)
4	5.5 – 7.9	11 a 16	Bonancible (Brisa moderada)
5	8.0 – 10.7	17 a 21	Fresquito (Brisa fresca)
6	10.8 – 13.8	22 a 27	Fresco (Brisa fuerte)
7	13.9 – 17.1	28 a 33	Frescachón (Viento fuerte)
8	17.2 – 20.7	34 a 40	Temporal (Viento duro)
9	20.8 – 24.4	41 a 47	Temporal fuerte (Muy duro)
10	24.5 – 28.4	48 a 55	Temporal duro (Temporal)
11	28.5 – 32.6	56 a 63	Temporal muy duro (Borrasca)
12	$\geq 32.7$	$\geq 64$	Temporal huracanado (Huracán)

### 3.1.2 Incidencia del oleaje

Según la Dirección General de Puertos (2008b), la altura y longitud de onda de la ola generan una combinación de los movimientos verticales antes mencionados los cuales no han sido ampliamente estudiados y solo existen aproximaciones teóricas y empíricas para aproximar la respuesta de la embarcación. La embarcación responde al movimiento oscilatorio irregular e intermitente del oleaje, la dirección, periodo y altura del mismo influye en diferente manera principalmente en el movimiento de cabeceo y balance, lo cual presenta un riesgo significativo a la seguridad de la embarcación, la tripulación y la carga (Kreuzer & Sichermann, 2005).

El oleaje influye en las consideraciones para el diseño de la profundidad del canal navegable como resultado de los movimientos verticales del barco, aún más si el canal se caracteriza por bajas profundidades. Sin embargo, también pueden tener efectos en el diseño del ancho. Además, la fuerza del oleaje puede generar efectos similares a las fuerzas del viento causando inestabilidades en el curso la embarcación (PIANC, 2014).

### 3.1.3 Incidencia de la densidad del agua y velocidad de la embarcación

Las diferencias en la densidad del agua entre el agua de mar y el agua dulce conducen a diferencias en el calado. Si una embarcación se mueve hacia aguas de menor densidad, el calado aumentará casi proporcionalmente. El calado de un barco aumentará aproximadamente del 2 al 3% en agua dulce en comparación con el agua de mar, ya que el desplazamiento de la embarcación es inversamente proporcional a la densidad del agua (PIANC, 2014).

De igual forma, la velocidad de la embarcación juega un papel fundamental en la variación del calado por variación de velocidad -*ship squat* en inglés- el cual consiste en un hundimiento de la proa de la embarcación principalmente por la velocidad de la embarcación, el calado y la características geométricas del canal (barras de arena y zonas de baja profundidad aumentan el *squat*) (Gourlay,

2003). La velocidad de la embarcación  $V_s$  respecto a la velocidad de la corriente  $V_r$  tiene gran relevancia dentro de canales interiores en ríos. La forma de caracterizar dentro del diseño de canales navegables la velocidad es a través del parámetro de Froude de la embarcación ( $F_{nh}$ ) el cual está en función de la velocidad relativa  $V$  y de la profundidad  $h_0$ . Este parámetro adimensional es una medida de la resistencia al movimiento en aguas poco profundas (Ecuación (2)). A medida que  $F_{nh}$  se acerca a 1, se alcanza una barrera en la cual la embarcación no tendría la potencia suficiente para ir más rápido por sus propios medios lo cual provoca la pérdida total de gobierno y quedando a la deriva de la corriente. Dentro de los reportes 121 y 141 PIANC (2014, 2019) y la discusión realizada por Eloot et al., (2008) se menciona que el valor límite de  $F_{nh}$  se sugiere entre 0.6 y 0.7; en el caso de que se presenten mayores valores se deben tomar medidas de seguridad dentro de la operatividad del puerto.

$$F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{gh_0}} \quad (2)$$

Özlem et al. (2019) y Wennink (1992) mencionan que el principal incidente que generan la variación de densidad y la velocidad de la embarcación respecto al flujo es el aumento de contactos con el fondo del canal, la combinación de un canal de poca profundidad sumado a las condiciones cambiantes de densidad en deltas y estuarios presenta condiciones especiales de análisis. Karahalios (2019) hace relación en su estudio a que este tipo de incidentes comprometen la seguridad de la embarcación, la económica del puerto y puede representar un riesgo al ecosistema si se compromete la estructura de la embarcación y esta permita la salida del contenido transportado, siendo más crítico en el caso de crudo y productos peligrosos tal como ocurrió en el incidente del buque Exxon Valdez en 1989, el cual generó el mayor derrame de petróleo a nivel mundial.

### 3.2 Caracterización estadística de variables

Para caracterizar y analizar las variables hidrometeorológicas se deben determinar las condiciones representativas. Para tal fin se debe disponer de series de tiempo en este caso de nivel, caudal, altura de ola, velocidad y dirección del viento, y marea para evaluar los regímenes medio y extremal para la generación de escenarios de riesgo.

#### 3.2.1 Análisis de frecuencias

El análisis de frecuencias es un procedimiento para estimar la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de eventos hidrológicas. Se busca principalmente ajustar el comportamiento de los datos observados en eventos extremos tanto máximos como mínimos a una distribución teórica de probabilidad. En análisis de frecuencias permite caracterizar la variable aleatoria en función de un periodo de retorno (en años) para determinar que un evento sea igualado o superado por lo menos una vez (Monsalve, 2008).

#### 3.2.2 Distribución de Probabilidad

La distribución de probabilidad es un modelo teórico que representa la forma en que se distribuye la ocurrencia de los resultados de cierto experimento aleatorio. La inferencia estadística consiste en extraer una muestra de una población y analizar sus datos con el propósito de aprender acerca de ello.



En estos casos la función de masa o de densidad de probabilidad se aproxima mediante una de muchas familias comunes de curvas o funciones (Navidi, 2007) a partir de estas distribuciones se generan las funciones de densidad de probabilidad (PDF) y las funciones de probabilidad acumulada (CDF).

### 3.2.3 Simulación de Montecarlo

La simulación de Montecarlo es un procedimiento matemático para reproducir variables aleatorias a partir de sus distribuciones de probabilidad. En esta simulación se busca reproducir una gran cantidad de escenarios en los cuales se puedan obtener resultados de varias operaciones matemáticas que involucren procesos estocásticos. La generación de números aleatorios varía según las metodologías presentes en la literatura y en función de la naturaleza de las variables de análisis (Tung & Yen, 2005). En el caso de la presente tesis, el número aleatorio se define a partir del método de Función de Distribución Acumulada Inversa -*CDF inverse method* en inglés- ya que todas las variables se ajustaron a distribuciones de probabilidad en las cuales se puede definir su respectiva función acumulada a partir de ecuaciones matemáticas explícitas ya desarrolladas.

Sea una variable aleatoria  $X$  que posee una CDF  $F_x(x)$  y una variable aleatoria uniforme estándar  $U$  definida dentro del rango  $[0, 1]$ , si se multiplica  $U$  por el inverso  $F_x^{-1}$  se puede obtener un valor aleatorio por simulación a través de la siguiente relación:

$$X = F_x^{-1}(U) \quad (3)$$

A través de la Ecuación (3), la relación uno a uno entre  $X$  y  $U$ , a través de la decisión de las distribuciones acumuladas permiten generar resultados aleatorios  $X \sim F_x(x)$  desde números aleatorios.

## 3.3 Modelación 2D

Entender el comportamiento de un río, estuario o en la costa requiere de información espacial y temporal como velocidades, transporte de sedimentos, geomorfología, etc. Estas variables varían en naturalmente o por efectos artificiales en función del régimen hidrológico, forzamientos meteorológicos (en zonas de desembocadura y en la zona costera), retención de sedimentos y actividades humanas como la construcción de estructuras hidráulicas, entre otras. Históricamente la principal herramienta para la evaluación del comportamiento hidrodinámico y morfológico de cauces fue a través de modelos físicos a escala en laboratorio, aunque estos presentan altos costos de construcción, operación y mantenimiento. Los modelos físicos requieren de una infraestructura y de una correcta instrumentación para evitar resultados incorrectos por medición y escalamiento (Frostick et al., 2011)

Una alternativa que ha ido creciendo en popularidad y aceptación en los últimos años es la modelación numérica de ríos. La modelación de ríos consta del análisis y la simulación de condiciones de flujo basadas en la formulación y solución de ecuaciones matemáticas que expresan principios hidráulicos. La modelación numérica ha demostrado ser la mejor herramienta en diferentes áreas de la ingeniería hidráulica por su practicidad, bajo coste y amplia gama de resultados para diferentes casos evaluados con un solo modelo. Los modelos numéricos disponibles varían según las ecuaciones de gobierno que resuelven, aplicabilidad, restricciones, soporte técnico, costo económico, estabilidad y demás

factores. Los modelos más reconocidos a nivel mundial para en análisis de ríos y los cuales se han aplicado para la modelación del río Magdalena se encuentran:

- **DELFT3D & DELFT3D FM:** desarrollados por Deltares (Países Bajos) DELFT3D es una de las plataformas de modelación más usadas en la investigación de la hidrodinámica, transporte de sedimentos, morfología y calidad de agua (Deltares, 2020a). DELFT3D es un modelo de libre acceso que permite cálculo de flujo no permanente y transporte de sedimento a partir de forzamientos meteorológicos y condiciones de borde definidas por el usuario. Trabaja con una malla curvilínea ortogonal a la que le pueden ser asignadas las condiciones de frontera. Tiene los módulos de hidrodinámica (FLOW), morfología (MOR), oleaje (WAVE) entre otros, según la necesidad de aplicación. Este modelo ha sido ampliamente aplicado en el río Magdalena (Ambagts et al., 2018; Cañizares, Alfageme, & Mahoney, 2007; Doets, 2015). DELFT3D FM se plantea como el modelo sucesor de DELFT3D y SOBEK, al igual que la versión anterior, este modelo permite simular flujos detallados niveles, oleaje, transporte de sedimento, morfología y calidad de agua bajo eligiendo entre una malla estructurada o no estructurada, esta última permite ajustar el dominio computacional a geometrías más complejas. Este modelo no es de libre acceso, tiene licencia comercial paga (Deltares, 2020b).
- **iRIC:** esta plataforma llamada *International River Interface Cooperative* es de libre acceso, permite el cálculo de hidrodinámica y la morfodinámica de los flujos geofísicos, con especial énfasis en los ríos y otros canales similares con fines educativos, en proyectos de ingeniería donde se requiere la evaluación de resultados con resultados precisos y en otras áreas más recientes como la eco-hidráulica para biólogos y ecologistas. Esta plataforma, a través de sus modelos, tiene un enfoque hacia la modelación bidimensional y tridimensional del flujos buscando ser instrumentos de fácil uso para una amplia variedad de problemas en la ingeniería fluvial (presas, obras de encauzamiento, desvíos de cauces, extracción o aumento de sedimentos, efectos en hábitats de peces, efecto de vegetación, modelación de inundaciones, formas de fondo y predicción morfológica entre otras) (Nelson et al., 2016). Varios de sus *solvers* (solucionadores) han sido aplicados en diferentes estudios a nivel mundial en los últimos años para modelación hidrodinámica y morfológica.

Tabla 3-3. Solucionadores incluidos dentro de la plataforma iRIC (Nelson et al., 2016)

<b>Solver</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Variación de tiempo</b>	<b>Hidrostática</b>	<b>Sistema coordinado</b>	<b>Inflow/Outflow</b>	<b>TS/EF/EO*</b>	<b>Refinación de malla</b>
FaSTMECH	2D/q3D	Quasi uniforme	Si	Curvilíneo ortogonal	Uno/Uno	Si/Si/No	No
Mflow_02	2D	No uniforme	Si	Triángulos no estructurados	Varios/Varios	Si/Si/No	Si
Nays2DH	2D	No uniforme	Si	Curvilíneo no ortogonal	Dos/Uno	Si/Si/Si	No
Nays2DFlood	2D	No uniforme	Si	Curvilíneo no ortogonal	Muchos/Uno	No/No/No	No
Morpho2DH	2D	No uniforme	Si	Curvilíneo no ortogonal	Uno/Uno	Si/Si/No	No

Solver	Dimensión	Variación de tiempo	Hidrostática	Sistema coordinado	Inflow/Outflow	TS/EF/EO*	Refinación de malla
NaysCUBE	2D	No uniforme	No	Curvilíneo no ortogonal	Uno/Uno	Si/Si/No	No
SToRM	2D	No uniforme	Si	Triángulos no estructurados	Varios/Varios	No/No/No	Si
River2D	2D	No uniforme	Si	Triángulos no estructurados	Varios/Varios	No/No/No	Si
CERI1D	1D	No uniforme	Si	N/A	Uno/Uno	No	No
SRM	2D	No uniforme	N/A	N/A	Espacial/Uno	No/No/No	No
NaysEddy	3D	No uniforme	Si	Ortogonal estructurado	Uno/Uno	Si/Si/No	No
ELIMO	2D	No uniforme	Si	Curvilíneo ortogonal	N/A	No/No/No	No

\*TS: Transporte de Sedimentos, EF: Evolución de Fondo, EO: Erosión de Orillas

- **MOHID**: es un programa numérico tridimensional para simular cuerpos de agua superficiales (océanos, estuarios, embalses). El modelo MOHID se ha aplicado a varias áreas costeras y estuarinas y ha demostrado su capacidad para simular características complejas de los flujos. El sistema resuelve las ecuaciones primitivas incompresibles, usando como supuesto el equilibrio hidrostático y utilizando la aproximación de Boussinesq y Reynolds. Ha sido utilizado para la modelación hidrodinámica en la desembocadura del Río Magdalena con un enfoque en la determinación de los perfiles de estratificación de salinidad, temperatura, velocidad y densidad en la zona de transición entre agua dulce y agua salada (Hernández, 2018; Ospino et al., 2018).
- **TELEMAC-MASCARET**: es conjunto integrado de solucionadores para su uso en la modelación de flujos de superficie libre. Está manejado por el consorcio de organizaciones centrales Artelia (antes Sogreah, Francia), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, Alemania), Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA, Francia), Daresbury Laboratory (Reino Unido), Electricité de France R&D (EDF, Francia), y HR Wallingford (Reino Unido). Los diversos módulos de simulación utilizan algoritmos de gran capacidad basados en el método de los elementos finitos. Los módulos incluidos dentro de TELEMAC son: ARTEMIS para agitación por oleaje en puertos, TELEMAC-2D, TOMAWAC para propagación de oleaje en zona costera, junto con otros módulos para transporte de sedimentos y dragado. Este modelo ha sido usado en el Río Magdalena para la modelación del sector Puerto Berrio – Barrancabermeja durante el contrato de Asociación Público Privada para recuperar la navegación en el río
- **MIKE 21C**: modelo desarrollado por el Danish Hydraulics Institute (DHI) para la simulación hidrodinámica, sedimentológica y morfológica de ríos (evolución del lecho y movilidad lateral de orillas). MIKE 21C es un modelo que trabaja a partir de una malla curvilínea ortogonal que permite recrear las curvaturas propias de los cauces fluviales (DHI, 2004). Este modelo resuelve dinámicamente las ecuaciones de continuidad y momento integradas en la vertical (ecuaciones de Saint Venant). A pesar de tener licencia comercial, MIKE-21C ha

sido ampliamente utilizado en la evaluación y diseño de sistemas de protección de orillas; optimización y diseño de canales de navegación fluvial; evaluación del impacto generado por obras hidráulicas; pronóstico de sedimentación para estructuras captación, zonas portuarias y represas. En Colombia se ha aplicado para el estudio de diferentes ríos como el Magdalena y el Meta (Acuña, Ávila, & Canales, 2019)

Dado que la presente tesis de investigación está centrada en la utilización de recursos de libre acceso, de fácil uso y altamente replicable, se utilizará el modelo parsimonioso Mflow\_02 de la plataforma iRIC para la modelación bidimensional del río Magdalena. Mflow\_02 es un solucionador de análisis para calcular el flujo no permanente en dos planos dimensiones y la variación del lecho del río mediante mallas no estructuradas del método de elementos finitos en el sistema de coordenadas ortogonales (sistema de coordenadas cartesianas). La versión original de Mflow\_02 se basó en el programa desarrollado G. Tomitokoro de la Universidad de Shinshu. A partir de entonces, M. Gamou, K. Hamaguchi y M. Ichiyama (Pacific Consultants Co. Ltd.). Este solucionador se integró en la plataforma iRIC 2.3 en julio de 2014. (Tomidokoro et al., 1985) (iRIC Project, 2020).

Mflow\_02 utiliza una malla no estructurada (elementos triangulares) para el cálculo de flujo no permanente en áreas incluyendo muelles, diques u otras estructuras hidráulicas, o para el cálculo de la inundación de zonas complicadas, como la zona de la llanura de inundación y la red de canales de ríos con muchos distribuidores y confluencias, Además, es posible reproducir el cálculo de la variación del lecho del río y el aspecto, desarrollo y movimiento de los bancos de arena. Existen varias aplicaciones prácticas, como la aplicación para la evaluación del impacto de los muelles, etc., la evaluación del impacto de la vegetación y los árboles, las inundaciones cálculo y la limpieza de los bancos de arena del estuario.

### 3.3.1 Conjunto de ecuaciones que resuelve el modelo

Mflow\_02 se basa en las ecuaciones de Navier Stokes en dos dimensiones desde la aproximación promediada de Reynolds (RANS), estas ecuaciones básicas son discretizadas en una variable espacial para el método Galerkin de elementos finitos:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

Ecuaciones de momento

$$\begin{aligned} \frac{\partial(uh)}{\partial t} + u \frac{\partial(uh)}{\partial x} + v \frac{\partial(vh)}{\partial y} - f(vh) \\ = -gh \frac{\partial H}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} v_{xx} \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} v_{yx} \frac{\partial(uh)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} v_{yx} \frac{\partial(vh)}{\partial x} + \frac{\tau_s}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{\tau_{tx}}{\rho} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(vh)}{\partial t} + u \frac{\partial(vh)}{\partial x} + v \frac{\partial(vh)}{\partial y} + f(uh) \\ = -gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} v_{xy} \frac{\partial(vh)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} v_{yx} \frac{\partial(uh)}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} v_{yy} \frac{\partial(vh)}{\partial y} + \frac{\tau_s}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{\tau_{ty}}{\rho} \end{aligned} \quad (6)$$

Donde:

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = C_f u \sqrt{u^2 + v^2}; \quad \frac{\tau_{by}}{\rho} = C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (7)$$

$$\frac{\tau_{tx}}{\rho} = C_t u \sqrt{u^2 + v^2}; \quad \frac{\tau_{ty}}{\rho} = C_t v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (8)$$

Mflow\_02 tiene diferentes modelos de turbulencia para el cierre de las ecuaciones de Navier-Stokes dentro de los que se encuentran valor fijo de viscosidad cinemática eddy, modelo de ecuación cero y modelo  $k - \varepsilon$ . Para la modelación presentada en esta investigación se utilizó el modelo  $k - \varepsilon$  simple, este resuelve la viscosidad cinemática eddy así:

$$\nu = C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \quad (9)$$

El modelo aplica la relación empírica propuesta por Nezu & Nakawaga (1993) la cual es aplicada para calcular la energía cinética turbulenta promediada en la vertical:

$$\frac{k}{u_*^2} = 4.78 \exp\left(-2 \frac{z}{h}\right) \quad (10)$$

$$k = 2.07 u_*^2 \quad (11)$$

La tasa de disipación de energía  $\varepsilon$  se evalúa dentro del modelo con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = C_\varepsilon \frac{k^{3/2}}{l} \quad (12)$$

Con  $C_\varepsilon = 0.17$ . A partir de estas formulaciones la viscosidad cinemática eddy puede calcularse sin resolver las ecuaciones de transporte de la disipación de energía  $\varepsilon$  y energía turbulenta  $k$ .

En el modelo la fricción de fondo se calcula a partir del coeficiente de rugosidad de Manning  $n$ . La Ecuación (13) expresa la fricción por el fondo del río:

$$C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (13)$$

En Mflow\_02 es posible seleccionar una resistencia al flujo adicional inducida por la vegetación presente en las planicies de inundación y por el efecto del viento en la superficie del agua. Para los efectos de la modelación para la presente tesis se despreció el efecto de la vegetación y solo se habilitó el efecto del viento en los resultados. Este esfuerzo de corte en la superficie del agua se evalúa con la Ecuación (14), esta es empírica basada en la velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie:

$$\tau_s = \frac{\rho_a}{\rho} C(u|_{10m})^2 \quad (14)$$

Donde  $\rho_a$  es la densidad del aire, C es el coeficiente de arrastre del viento y  $u|_{10m}$  es la velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie del agua.

### 3.4 Geometría hidráulica

La geometría hidráulica es una forma de describir cuantitativamente como el ancho, profundidad, velocidad y propiedades relacionadas con el caudal varían espacial y temporalmente. La relación entre la morfología del río, caudal líquido y transporte de sedimentos en un estado dinámico o en Quasi-equilibrio y está relacionado por este factor, el cual refleja características del cauce (Ran et al., 2012). Las ecuaciones generadas para la generación de geometría hidráulica más aceptadas son las desarrolladas por Leopold y Maddock (1953), este enfoque se centra principalmente en la aplicación de tres ecuaciones empíricas potenciales, donde el caudal a sección llena domina en la configuración de la morfología de la sección transversal del canal. Este estudio teórico-empírico de la geometría hidráulica tiene el problema de cierre de las ecuaciones, para un problema de geometría hidráulica que tiene cuatro variables (ancho del río, profundidad del agua, velocidad del flujo y pendiente del lecho del río) solo hay tres ecuaciones: la ecuación de continuidad del flujo, la ecuación de resistencia del flujo y la ecuación del transporte de sedimentos.

Nuevas formulaciones como la teoría estadística de entropía se han generado para describir la geometría de ríos y canales aluviales a partir de la relación  $\varepsilon = B^j/h_o$ , donde  $\varepsilon$  es la geometría hidráulica, B es el ancho de la sección de análisis,  $h_o$  es la profundidad promedio de la sección, y j es el coeficiente exponencial de la ecuación. La idea detrás de la entropía parte del concepto de que un sistema tiende a maximizar su entropía bajo las mismas restricciones en un estado de Quasi-equilibrio. La utilización del modelo de entropía consolida el transporte de sedimentos y los procesos hidrodinámicos y morfodinámicos en el río dentro de un dominio ya que los cambios que ocurren en cauce se ajustan, maximizando al entropía propia del sistema. El concepto de entropía fue desarrollado por Shannon (1948)

$$H(x) = - \int p(x) \ln(p(x)) dx \quad (15)$$

La variable aleatoria x en este caso es la geometría hidráulica, el principio de maximización de entropía se aplica para identificar la densidad de probabilidad de la geometría hidráulica  $p(\varepsilon)$ . Asumiendo que no existen cambios significativos a los que ya naturalmente se presentan se dice que

el sistema tiende a estar en un estado dinámico o en Quasi-equilibrio en el que todas las variables características de un río se ajustan para reducir la tasa de pérdida de energía mecánica disponible del flujo con sedimentos bajo ciertas restricciones con agua y sedimentos entrantes propias del régimen hidrológico.

$$H(\varepsilon) = - \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_0} p(\varepsilon) \ln p(\varepsilon) d\varepsilon \quad (16)$$

En el estado inicial correspondiente al tiempo  $t_0$ , el valor de la geometría hidráulica es  $\varepsilon_0$ , mientras que el valor de la geometría hidráulica disminuye a  $\varepsilon_1$  en el tiempo  $t_1$  en el estado final. Suponiendo que todos los valores de  $\varepsilon$  entre  $\varepsilon_0$  y  $\varepsilon_1$  poseen la misma probabilidad o son igualmente probables, se puede afirmar que la probabilidad de que la geometría hidráulica sea igual o menor que  $\varepsilon$  es  $1 - (t - t_0)/(t_1 - t_0)$

$$p(\varepsilon) = \frac{dF(\varepsilon)}{d\varepsilon} = \frac{dF(\varepsilon)}{dt} \frac{dt}{d\varepsilon} = - \frac{1}{t_1 - t_0} \frac{dt}{d\varepsilon} = - \left[ (t_1 - t_0) \frac{d\varepsilon}{dt} \right]^{-1} \quad (17)$$

Para satisfacer la maximización de la entropía se debe satisfacer la siguiente ecuación diferencial

$$\frac{\partial [-p(\varepsilon) \ln p(\varepsilon)]}{\partial p(\varepsilon)} + \lambda_1 \frac{\partial [p(\varepsilon)]}{\partial p(\varepsilon)} + \lambda_2 \frac{\partial [\varepsilon p(\varepsilon)]}{\partial p(\varepsilon)} = 0$$

Resolviendo la ecuación diferencial se obtiene la relación de geometría hidráulica dependiente del tiempo derivada como función del ancho, profundidad promedio, tiempo y coeficiente  $K$ . Si se conoce la condición inicial y final de geometría hidráulica en una sección transversal se puede calcular la geometría para cualquier tiempo  $t$  comprendido entre  $t_0$  y  $t_1$ . Esta relación permite conocer de forma aproximada la geometría hidráulica para fechas en las cuales no se tiene información a modo de complementar los datos faltantes y de caracterizar la sección

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{k} \ln \left[ e^K - \left( e^K - e^{K \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}} \right) \frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right] \quad (18)$$

La aplicación del modelo de entropía para la caracterización de la geometría hidráulica del río ha sido validada en varios estudios como en el presentado por Mao & Chen (2018) y Singh (2014).

## 4 METODOLOGÍA

En este capítulo se explica la metodología planteada para el desarrollo de la presente tesis y las suposiciones tomadas en cuenta para lograr el objetivo general. La navegación en el río Magdalena se encuentra condicionada gran parte del tiempo por la variación condiciones del hidráulicas del río y meteomarinas de la zona costera. El modelo de riesgo propuesto plantea evaluar escenarios esperados operativos a partir de las variables hidrometeorológicas con el fin de reducir la incertidumbre operativa de ingreso y salida de buques dadas las restricciones ambientales. A pesar de que el tema de riesgo se ha abordado en diferentes normativas, reportes y recomendaciones de diseño de canales navegables, el planteamiento presentado permite analizar la interacción de variables ambientales con la navegación, parte del análisis de riesgo que no se analiza en profundidad. La metodología planteada está pensada para ser altamente replicable variando únicamente los datos de entrada y teniendo en cuenta las condiciones particulares de cada sector a partir de una aproximación cuantitativa al porcentaje de riesgo de navegación en puerto a partir curvas empíricas.

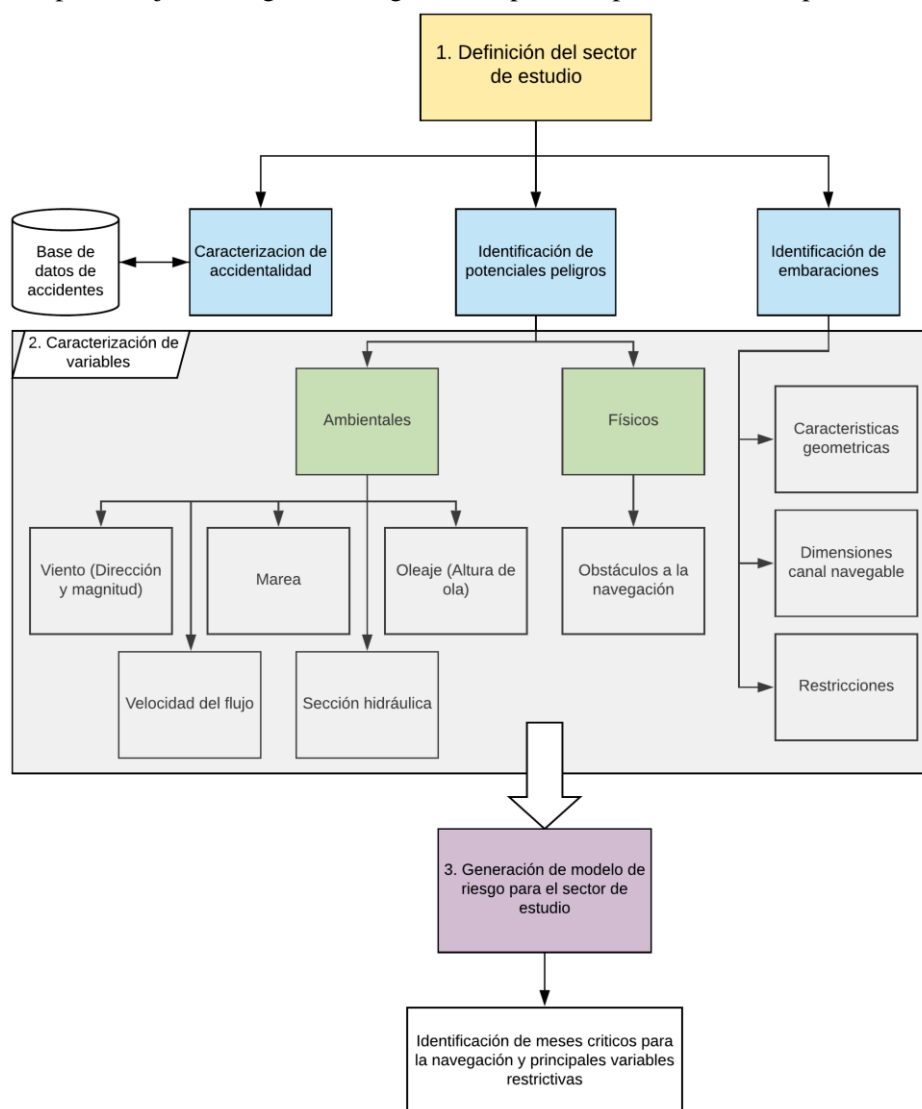


Figura 4-1. Esquema general de la metodología para el análisis de riesgo



#### 4.1 Definición del sector de estudio y características

Inicialmente se requiere identificar y caracterizar el sector de estudio para dar un contexto tanto espacial como de la importancia económica del puerto dentro de la región o país. La caracterización permite conocer y describir los principales factores y variables que hacen parte del dominio de estudio para una correcta identificación dentro del análisis de riesgo.

- Descripción y contextualización geográfica.
- Descripción de las condiciones actuales de navegación, dentro de la que se incluyen las restricciones actuales y características geométricas del canal navegable actual.
- Evolución morfológica.
- Identificación de obstáculos a la navegación y caracterización de la accidentalidad en el puerto a partir de registros históricos.

#### 4.2 Definición de embarcaciones de diseño

Dentro de la caracterización se incluyen las embarcaciones que arriban al sector de estudio identificando sus características geométricas, tipo (arquitectura naval) y calado operativo. A modo práctico para el análisis de riesgo se selecciona la embarcación de mayor dimensión y frecuencia de arribo al puerto teniendo en cuenta la carga máxima dado el calado operativo predominante en el sector de estudio.

#### 4.3 Caracterización de las variables hidrometeorológicas

Dado que el análisis de riesgo se plantea con base a variables hidrometeorológicas estas se deben caracterizar y determinar cómo varía a lo largo del año según la estación o el mes a partir de un análisis estadístico. Para esto se requiere la consulta en bases de datos, la clasificación y análisis de los registros históricos para cada una de las variables a analizar dentro del análisis de riesgo.

- Análisis de niveles del río.
- Análisis de caudales del río.
- Curva de correlación caudal-nivel (curva HQ).
- Registros batimétricos para la generación de geometría hidráulica del canal navegable y montaje del modelo numérico hidrodinámico.
- Velocidad y dirección del viento.
- Amplitud de oleaje.
- Amplitud de marea.

Para cada una de las variables se busca identificar principalmente:

- Análisis de distribución de probabilidad de los registros.
- Análisis de probabilidad acumulada de los registros.
- Análisis de probabilidad conjunta para registros de dirección y magnitud del viento.

- Análisis de frecuencia de valores máximos y mínimos.
- Variación espacial y temporal en el caso de la caracterización de geometría hidráulica.

#### 4.4 Modelación hidrodinámica 2D

La velocidad del flujo a lo largo del sector de estudio requiere de la modelación hidrodinámica en un modelo numérico computacional. La modelación bidimensional permite identificar espacialmente la variabilidad espacial de la velocidad teniendo en cuenta una mejor definición la geometría de cauce y la influencia de estructuras hidráulicas. Dado que el canal navegable se encuentra por lo general en la zona más profunda del río, esta zona presenta velocidades diferentes a un promedio de la velocidad de toda la sección por lo cual se requiere de un mejor detalle de la variación de la velocidad para el canal navegable, comparado con los resultados de un modelo unidimensional. Las salidas del modelo son exportadas luego a un SIG para la generación de rasters de velocidad solamente para la zona del canal navegable y la generación de estadísticas espaciales de velocidad. La utilización de resultados de modelos hidrodinámicos ha sido discutida ampliamente para la generación de escenarios de riesgo espaciales basados en la respuesta de la embarcación frente a las condiciones hidrológicas del canal navegable (S. Zhang et al., 2019).

La modelación numérica requiere de datos de entrada para el montaje de la geometría, calibración y validación de resultados, estos datos se obtienen en los pasos anteriores. Para la presente tesis se utilizó el modelo Mflow\_02 disponible en la plataforma iRIC (Nelson et al., 2016), aunque se puede utilizar otro modelo numérico mientras que sus resultados sean calibrados y validados.

#### 4.5 Estimación del riesgo frente a escenarios aleatorios

A partir de los resultados de caracterización de variables y restricciones en el sector de estudio se procede a generar curvas de probabilidad de ocurrencia y de vulnerabilidad empíricas a partir de datos recolectados en reportes marítimos y meteorológicos, mesas de trabajo con metodología HAZOP, y planteamientos ya existentes en metodológicas de riesgo para la asignación de categorías. Se busca poder realizar una categorización del riesgo ya sea de forma discreta o continua (Organización Marítima Internacional, 2018; D. Zhang et al., 2013; J. Zhang et al., 2016). La metodología planteada en la presente tesis está pensada para la identificación de escenarios de riesgo bajo condiciones operativas para un año normal, teniendo en cuenta además, los periodos de retorno de las variables hidrometeorológicas en un umbral de hasta 5 años.

En la Figura 4-2 se presenta a modo esquemático la metodología planteada por pasos desde la definición de variables de entrada hasta la estimación del riesgo.

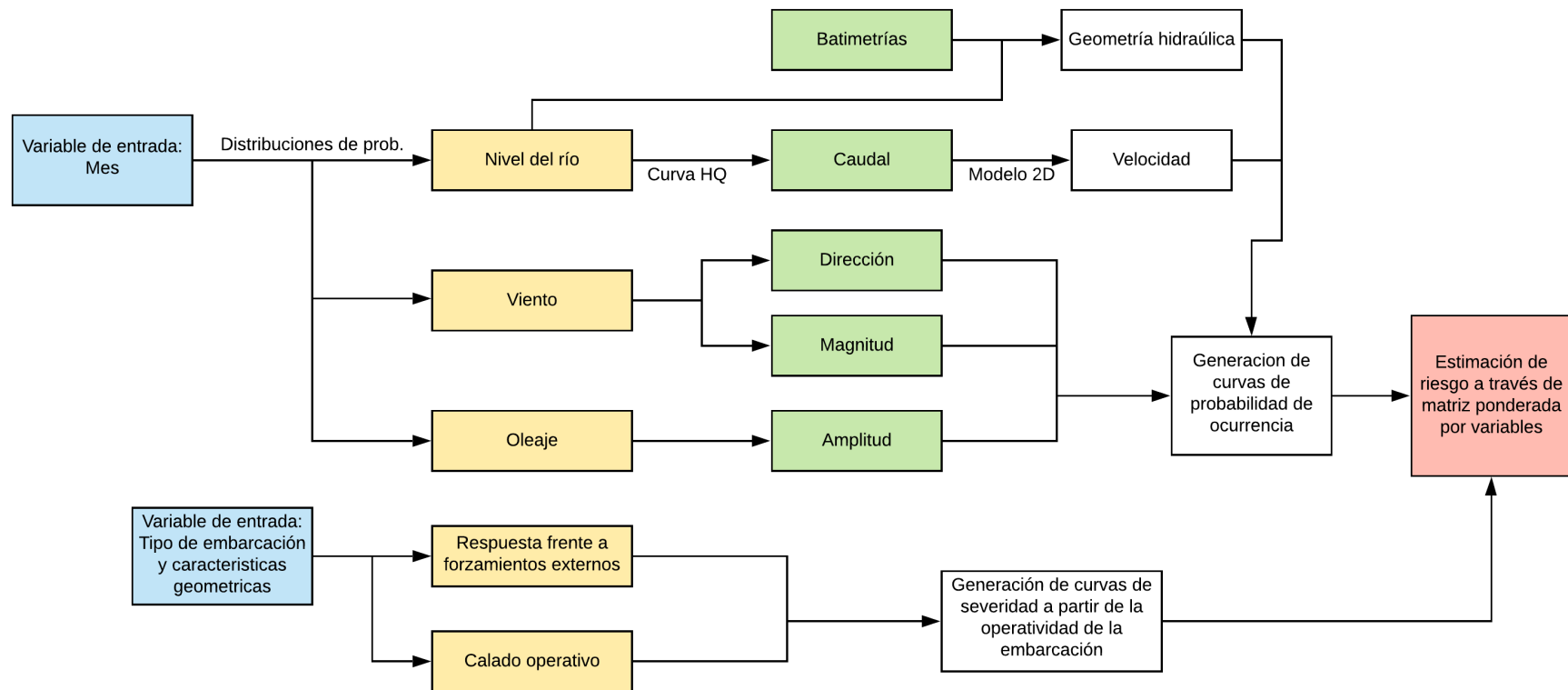


Figura 4-2. Metodología planteada para el análisis de riesgo

#### 4.5.1 Definición de niveles y generación de curvas de probabilidad de ocurrencia de variables hidrometeorológicas

La caracterización de probabilidad de ocurrencia a través de niveles atiende principalmente a discretización de una variable continua a través de criterios cualitativos, esta metodología es la más usada a nivel mundial (DNV GL, 2018; Shearman, 2016) y se presenta como una aproximación inicial. En la Tabla 4-1 se presenta la definición de los niveles de probabilidad usados en diferentes casos de estudio.

*Tabla 4-1. Niveles de probabilidad de ocurrencia para variables hidrometeorológicas. (DNV GL, 2018)*

Nivel	Criterio	Probabilidad acumulada
1	Muy poco probable: puede ocurrir en casos excepcionales	>0.95
2	Poco probable: podría ocurrir pero es dudoso	0.875-0.95
3	Mediana probablemente: poco frecuente pero podría ocurrir	0.75 -0.875
4	Probable: probable que ocurra alguna vez en el próximo periodo	0.5 – 0.75
5	Muy probable: común o repetitivo, siempre ocurre dentro del año	≤0.5

Cada una de las variables hidrometeorológicas principales de análisis se clasifica en función de la probabilidad de ocurrencia tanto en régimen medio (operacional) y para régimen extremal dentro de los registros. A partir de la información recolectada se procede a ajustar curvas de probabilidad empíricas ( $f(x)$ ) para cada una de las variables hidrometeorológicas de estudio para el modelo.

#### 4.5.2 Definición de niveles y generación de curvas de vulnerabilidad para variables hidrometeorológicas

La caracterización de vulnerabilidad a través de niveles atiende principalmente a discretización de una variable continua a través de criterios cualitativos para determinar la exposición o posible afectación que pueda tener la embarcación. En la Tabla 4-2 se presenta la definición de los niveles de vulnerabilidad tenidos en cuenta para la categorización.

*Tabla 4-2. Niveles de vulnerabilidad para la embarcación*

Nivel	Criterio
1	Sin daño a la embarcación, navegación normal a calado definido
2	Navegación con precaución o con restricciones parciales
3	Condiciones ambientales restrictivas a la navegación
4	Restricción casi total a la navegación , embarcaciones parten con muy poco calado operativo o con condiciones climáticas adversas
5	Daño severo a la embarcación, restricción total a la navegación

La curva de vulnerabilidad empírica ( $g(x)$ ) se define a partir de los criterios operativos de la embarcación frente a cada una de la variables de estudio a modo aproximado, teniendo en cuenta como se compromete tanto la actividad de navegación como la seguridad e integridad de la embarcación con datos de los actores presentes en el río y del criterio de expertos.

#### 4.5.3 Matriz de riesgo y evaluación de escenarios

A partir de las distribuciones de probabilidad definidas en pasos anteriores se procede a generar escenarios aleatorios para cada una de las variables de análisis a través simulación de Montecarlo aplicando  $n$  escenarios, los valores aleatorios generados hacen parte de las curvas empíricas de probabilidad  $f(x)$  y vulnerabilidad  $g(x)$ . Para cada simulación se calcula el riesgo como la integral de la multiplicación de las funciones establecidas para cada una de variables.

$$R_i(x) = \int f(x)g(x) dx \quad (19)$$

El resultado del cálculo del riesgo se clasifica en función del valor final, en la Tabla 4-3 y Tabla 4-4 se presenta la clasificación de riesgo según las categorías en función del valor obtenido de riesgo.

Tabla 4-3. Matriz para la clasificación de valores de riesgo  $R(x)$

<b>Probabilidad</b>	<b>1</b>	1	2	3	4	5
	<b>2</b>	2	4	6	8	10
	<b>3</b>	3	6	9	12	15
	<b>4</b>	4	8	12	16	20
	<b>5</b>	5	10	15	20	25
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
		<b>Vulnerabilidad</b>				

Tabla 4-4. Definición de categorías y rango de valores de la matriz de riesgo

<b>Categoría de riesgo</b>	<b>Valor de riesgo</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Definición</b>
<b>1</b>	<b><math>R &lt; 5</math></b>	Poco/Nulo	No se requieren acciones
<b>2</b>	<b><math>5 \leq R &lt; 10</math></b>	Menor	No se requieren acciones, pero se debe monitorear
<b>3</b>	<b><math>10 \leq R &lt; 15</math></b>	Moderado	Navegación restringida
<b>4</b>	<b><math>15 \leq R &lt; 20</math></b>	Alto	La navegación solo puede realizarse bajo autorización de DIMAR
<b>5</b>	<b><math>R \geq 20</math></b>	Inaceptable	Navegación prohibida

## **5 IDENTIFICACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO: SECTOR PORTUARIO DE BARRANQUILLA**

### **5.1 Generalidades del sector de estudio**

El río Magdalena desemboca en el Mar Caribe en la zona de Bocas de Ceniza ( $11^{\circ}06'22.78''$  N  $74^{\circ}51'08.19''$  W) cerca de la ciudad de Barranquilla. El delta del río Magdalena tiene una extensión de aproximadamente  $1690 \text{ km}^2$  entre los departamentos de Atlántico y Magdalena, sobre el departamento del Atlántico se encuentran el área metropolitana de Barranquilla, constituido por los municipios de Barranquilla, Soledad, Malambo, Galapa y Puerto Colombia, esta área se caracteriza por ser el núcleo económico de la región Caribe colombiana y el cuarto a nivel nacional. Sobre el departamento del Magdalena se encuentra el municipio de Sitio Nuevo, aunque se hace referencia más comúnmente al corregimiento de Palermo en el cual se ubica la Sociedad Portuaria de Palermo a orillas del río. Más hacia el norte se encuentra Vía Parque Salamanca, área protegida ambientalmente debido a la gran cantidad de fauna y vegetación que se encuentra en esta área. Al oriente del cauce principal actual, sobre la llanura deltaica, se extiende un sistema cenagoso conformado por la ciénaga Grande de Santa Marta, la ciénaga de Pajarales y otras lagunas menores. (Bernal, 1996).

El sector de estudio se encuentra delimitado por el alineamiento del canal navegable definido por Cormagdalena entre el kilómetro K0+000 hasta el kilómetro K21+825 en inmediaciones del puente Pumarejo, sector predominante fluvial (Figura 5-1). En el Anexo se presentan la Figura 9-1, Figura 9-2 y Figura 9-3 como referencia las cartas náuticas utilizadas por la autoridad marítima y los detalles técnicos del canal navegable diseñado por Cormagdalena. Por el canal de acceso transitan embarcaciones hacia los diferentes puertos ubicados sobre las orillas del río Magdalena, como la Sociedad Portuaria de Barranquilla, RiverPort, la Sociedad Portuaria Palermo, BITCO, PortMagdalena, Monómeros y otras. Actualmente, el río requiere un dragado de mantenimiento frecuente por los niveles de sedimentación, y un mayor seguimiento y modelación de variables hidrosedimentológicas que permitan reducir los problemas de operatividad en el sector portuario de la ciudad (MinTransporte, 2015). En el tramo evaluado del río Magdalena se ubican varias empresas portuarias dedicadas al manejo de diferente tipo de carga. Asoportuaria registró en el 2017 que las principales embarcaciones transportan contenedores, hidrocarburos, granel y minerales. Todas las embarcaciones que arriban tienen un calado operativo inferior a 10 m debido a las restricciones en el acceso al canal.

Como punto de partida, se deben caracterizar los tipos de embarcaciones que han arribado al puerto de Barranquilla, sus características geométricas y sus restricciones a la navegación, al igual que las características morfológicas del cauce. Esta información es necesaria para la generación de los modelos probabilísticos de riesgo de navegación ya que cada embarcación es diferente y por ende cada una posee restricciones a la navegación especiales.

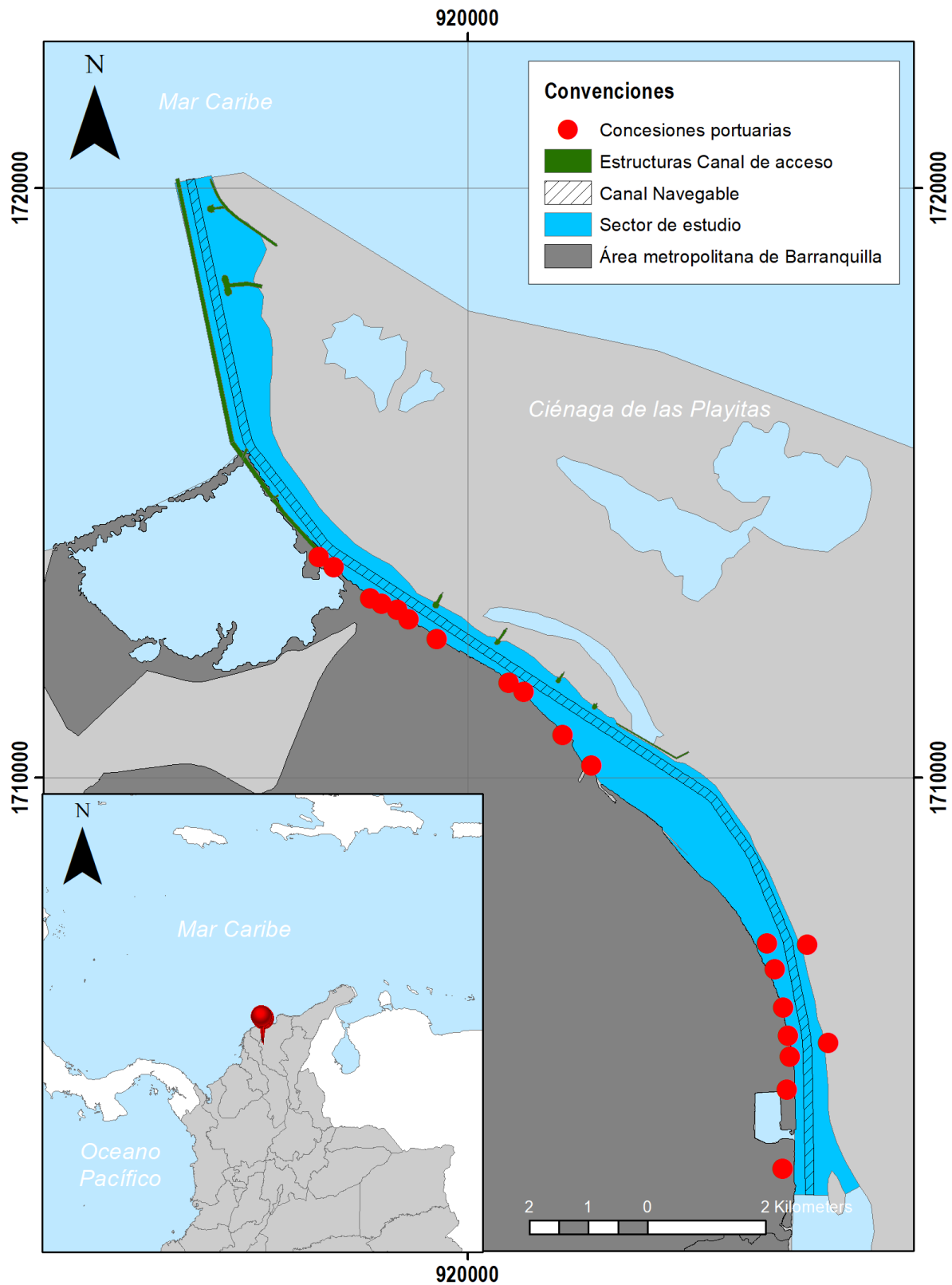


Figura 5-1. Sector de estudio

#### 5.1.1 Características generales de la navegación de en el sector y canal navegable

La navegación en el sector portuario de Barranquilla se realiza a través del canal navegable diseñado por Cormagdalena como información de referencia para los navieros, navegantes y para la autoridad marítima (DIMAR-Capitanía de puerto de Barranquilla). Las características geométricas del trazado del canal navegable están definidas en el contrato de dragado del canal de acceso de los periodos 2019 y 2020 (Findeter & Cormagdalena, 2020). El canal conceptual de referencia se plantea como un canal doble vía que permite el tráfico de las embarcaciones en sentido opuestos. Las consideraciones para este tramo (coordenadas del alineamiento, de los límites del canal y de las zonas de maniobra) se encuentran en el plano final entregado por Cormagdalena (ANEXO 3).

- **Tramo Boya de Mar (K-3+000)– Bocas de Ceniza K0+000 (3.0 Km):** este tramo del canal navegable se considera netamente como mar abierto, con densidad del agua de mar, pero cambiante a agua dulce a medida que se aproxima a Bocas de Ceniza. El sector está sometido frecuentemente a fuerte oleaje casi siempre proveniente del Noreste, expuesto a todo tipo de condiciones de vientos, corrientes cambiantes, y la presencia de una zona inestable de sedimentación. Según DIMAR, para varios meses del año cuando las condiciones meteomarinas son extremas no se permite la navegación, hacer mediciones ni dragados con equipo de succión en marcha. El ancho de solera del canal empieza en 320 m en cercanías a la Boya de Mar y reduciéndose hasta los 200m de ancho en el K0-700. En los contratos de dragado se debe asegurar una profundidad mayor o igual a los 12.19 metros. El canal navegable en forma de cono truncado que se va angostando a medida que se aproxima a la desembocadura.
- **Tramo Bocas de Ceniza K0+000 – K2+000 (2,0 Km) y Tramo K2+000 – K21+825 (19,82 Km):** El canal de referencia entre la desembocadura (K0+000) hasta el dique de contracción (K2+000) conserva los 200 m de ancho de solera con una profundidad mayor a 12 m. se presenta generalmente una barra de arena en los primeros 200 m que varía su ubicación dependiendo principalmente de las condiciones del régimen hidrológico del río y los forzamientos climáticos de la zona costera. En este tramo se intensifica el cambio de densidad por el efecto de la cuña salina, se presenta un fenómeno local de refracción del oleaje entre las estructuras hidráulicas existentes, y se presentan una continua necesidad de dragado de mantenimiento a lo largo del año. En este tramo disminuyen paulatinamente los efectos del oleaje.  
En el tramo K2+000 – K21+825 (19.825 Km), es el canal interior actualmente utilizado para el Puerto Marítimo, para este tramo el ancho del canal se reduce a 150 m y la profundidad de referencia es de mínimo 11.40 m a lo largo del mismo. Es un sector generalmente semiconfinado donde están situados la mayoría de los Terminales habilitados, la zona de fondeo y las zonas de maniobra. Los efectos de los vientos, aunque persisten, se encuentran atenuados y las corrientes del río, actualmente varían debido a los diferentes anchos del cauce generados. En este sector se presentan las zonas de giro o maniobra las cuales se deben mantener mediante obras de dragado (Zonas de Giro Prado entre el K09+270 al K10+140, la Zona de giro Paraíso entre el K19+400 al K20+850 y la Zona de Giro Barrio Abajo entre el K21+150 al K21+750).



Debido a los procesos de sedimentación que se presentan a lo largo del sector de estudio, la DIMAR define el calado operativo para el zarpe y arribo de embarcaciones al puerto de Barranquilla, el calado es una de las principales variables. La Figura 5-2 muestra la serie de tiempo de los calados operativos autorizados por la DIMAR entre enero de 2016 y octubre de 2019. En la figura se observa que entre febrero de 2016 a diciembre de 2016 el calado operativo se mantuvo uniformemente en 10 m, tiempo durante el cual estuvo operando la APP 2014 del río por parte de NAVELENA. Posterior a diciembre de 2016, cuando el contrato de APP fue suspendido, el calado operativo fue muy irregular y poco competitivo con registros hasta 7.5 m en los cuales la navegación fue suspendida; esta alta fluctuación e incertidumbre, asociado a procesos de dragado reactivo y no permanente presentan un riesgo a la navegación. Posteriormente, a partir de octubre de 2019, los registros muestran nuevamente una regularidad en el calado operativo en torno a los 10 m, asociado a la operación de una draga permanente por el contrato de Findeter-Cormagdalena.

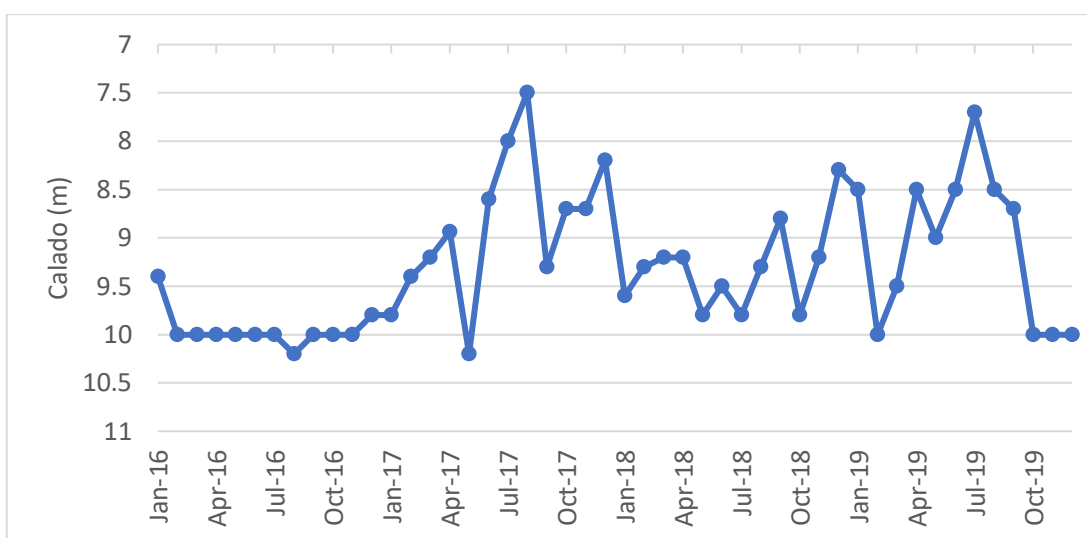


Figura 5-2. Calado operativo reportado por DIMAR para el sector de estudio 2016-2018

En la Tabla 5-1 se resumen las características del canal navegable diseñado por Cormagdalena

Tabla 5-1. Características geométricas del canal navegable. (Findeter & Cormagdalena, 2020)

Abscisa		Embarcación de referencia		Canal navegable	
Inicio	Fin	Manga (m)	Eslora (m)	Ancho de solera (m)	Profundidad mínima (m)
K-3+000	K0+000	32.2	190	316 hasta 200	12.19
K0+000	K2+000			200	12.0
K2+000	K21+825			150	11.40

Todos los cálculos y consideraciones posteriores son tomadas para el canal navegable definido por Cormagdalena desde el K0+000 hasta el K21+825 en el Anexo (Figura 9-3) se presenta el plano del canal navegable.

### 5.1.2 Evolución morfológica de la zona

La desembocadura del río Magdalena por Bocas de Ceniza ha tenido una evolución morfológica con acción antropogénica considerable, estabilizada en gran parte por las obras de encauzamiento realizadas. Restrepo (2014) presenta que antes de 1924, el sistema del Magdalena podía clasificarse como un delta dominado por el oleaje. Entre 1894 y 1924, el número y posición de los cordones de playa, espigas litorales, islas de desembocadura, y barras cambiaba continuamente, formando diferentes conexiones entre el canal fluvial y el sistema lagunar costero (Figura 5-3a y 9.3b). Con el fin de evitar los procesos de sedimentación que se presentaban en la desembocadura, y así promover la navegación comercial hacia el Puerto de Barranquilla, se construyó parte del tajamar occidental y dique Boyacá a lo largo del canal principal. Los objetivos principales fueron canalizar la desembocadura, reducir la sección transversal del río, incrementar la velocidad del flujo, y aumentar la competencia para el transporte de sedimento (Alvarado, 2009). Por lo tanto, a partir de 1936 la desembocadura ha estado definida por un canal singular de descarga, aislado de la Ciénaga de Mallorquín (Figura 5-3c).

Estas estructuras alteraron el balance de erosión/sedimentación a lo largo del frente deltaico, conduciendo a un retroceso significativo de la línea de costa y a la expansión de áreas no consolidadas a lo largo de las márgenes occidental y oriental, respectivamente (Alvarado, 2009). Los tajamares fueron reforzados y prolongados 120 m y 53 m en 1949 y 1951, respectivamente (Figura 5-3d). Entre 1994 y 1995, sobre la margen oriental se construyó el dique direccional (K14) de 1.2 km de longitud para cerrar un canal secundario y concentrar el flujo a lo largo del canal principal. Además, fueron construidos cuatro diques de contracción adicionales (de 70 a 290 metros de extensión) para reducir la sección transversal del río, incrementar la velocidad de flujo, y desplazar el canal profundo hacia la margen occidental (Alvarado, 2009; Cañizares et al., 2007; Schmied & Cañizares, 2009). Finalmente, entre 2008 y 2009, fueron construidos dos diques de contracción de 0.67 km y 0.23 km sobre el segmento norte del tajamar oriental para reducir aún más la sección transversal en la desembocadura.

Gomez et al. (2019) presentan un análisis de dinámica fluvial en el sector de estudio a partir de imágenes satelitales entre 1986 a 2019. El procesamiento de información muestra que existen locaciones específicas en las cuales se han presentado variaciones espaciales debido a las intervenciones antropogénicas y de dinámica natural del río. Las mayores variaciones en la movilidad de orillas se registra en la Isla Rondón (K22) en límite aguas arriba del sector del estudio, esta isla registra una pérdida de área de cerca del 80% desde el 2010 respecto a las condiciones que venía en años anteriores, el proceso erosivo estuvo ligado a la incidencia del periodo de caudales altos del evento La Niña 2010-2011 (Gomez et al., 2019; Vargas, 2014). Actualmente se evidencian procesos de erosión en la orilla oriental en el kilómetro 14, además se presenta recurrentemente una zona de sedimentación cambiante en el fondo del río en el cual se reducen las profundidades del canal navegable y es una zona de constante dragado (CIIC, 2020; Findeter & Cormagdalena, 2019). Así mismo desde 2018 se evidencia la formación de una barra de sedimentos en la orilla occidental entre el kilómetro 15 al kilómetro 18 la cual ha reducido la sección transversal del río y acentuando la erosión que se desarrolla aguas abajo debido a la concentración del flujo sobre la margen oriental.

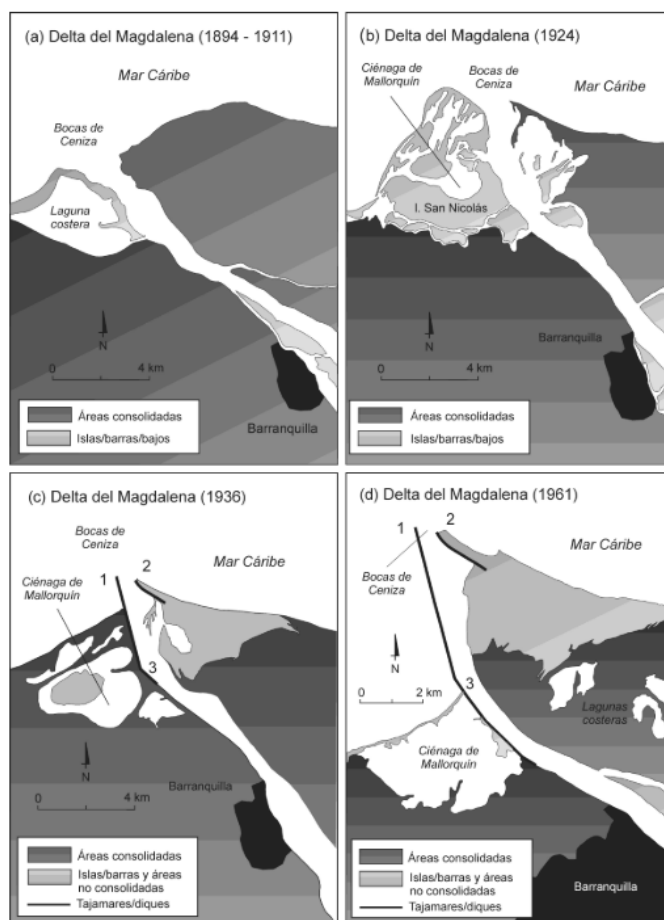


Figura 5-3. Representación esquemática del delta del río Magdalena entre 1894 y 1961, de acuerdo con gráficos y mapas históricos de (a) 1894 – 1911, (b) 1924, (c) 1936, y (d) 1961. (J. C. Restrepo, 2014)

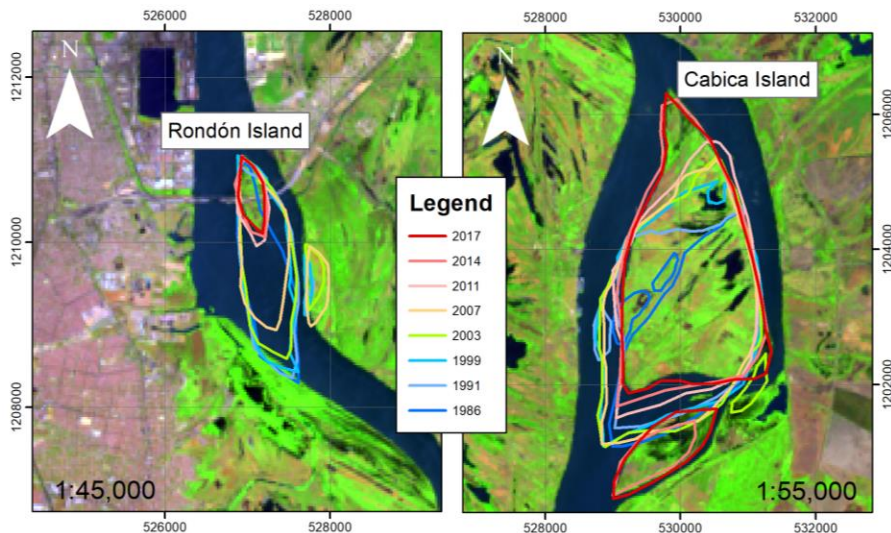


Figura 5-4. Evolución morfológica sectores islas Rondón (K22) y Cabica (K27). (Gomez et al., 2019)

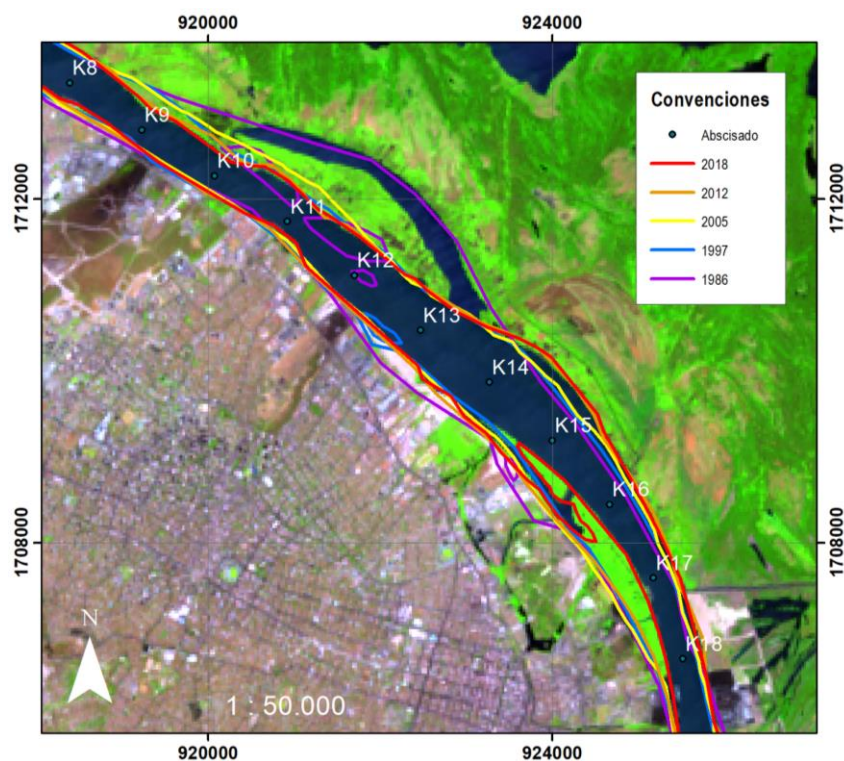


Figura 5-5. Evolución morfológica sector K9 – K18

### 5.1.3 Identificación de obstáculos a la navegación

En el estudio realizado para el mejoramiento de la infraestructura para la navegación del canal de acceso al puerto de Barranquilla (INVIAS, 2020) se realizaron dos campañas de levantamientos batimétricos en el sector para identificar los diferentes obstáculos a la navegación. Los resultados identificaron seis obstáculos en el sector de estudio, de los cuales, cuatro están en las proximidades del canal navegable. En la Figura 5-6 se muestra la localización espacial de los obstáculos y en la Tabla 5-2 se presenta a modo de resumen las características de los artefactos.

Tabla 5-2. Localización de obstáculos y distancia al canal navegable

ID	Norte	Este	Cota	Distancia al canal
1	925529.9	1706641	-15	0
2	925645.8	1706802	-8	120
3	926349.1	1703693	-9	482
4	925848.4	1702925	-8	81
5	926549.6	1703169	-2.5	702
6	925740.6	1702817	-5	0

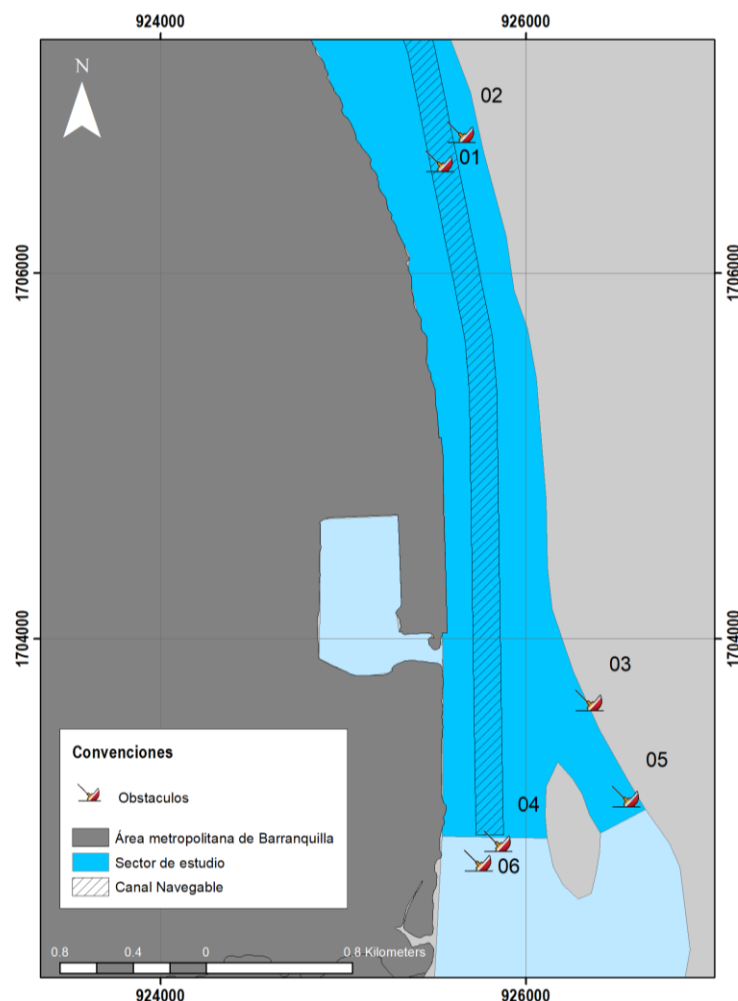


Figura 5-6. Localización de obstáculos a la navegación en el sector de estudio.

De los obstáculos identificados, solo el obstáculo 01 se encuentra en las inmediaciones del canal navegable aunque la cota a la cual se encuentra no representa un riesgo para la navegación de las embarcaciones típicas que navegan en el sector. A pesar de que los obstáculos 04 y 06 se encuentran en el alineamiento, estos se localizan en inmediaciones de las pilas del viejo puente Pumarejo, hasta que no se realice la demolición de este no se consideran como objetos relevantes. El resto de los obstáculos identificados no representan en sí un riesgo para la navegación del canal navegable por su ubicación y no se encuentran en las inmediaciones de sociedades portuarias.

#### 5.1.4 Caracterización de accidentalidad en el sector

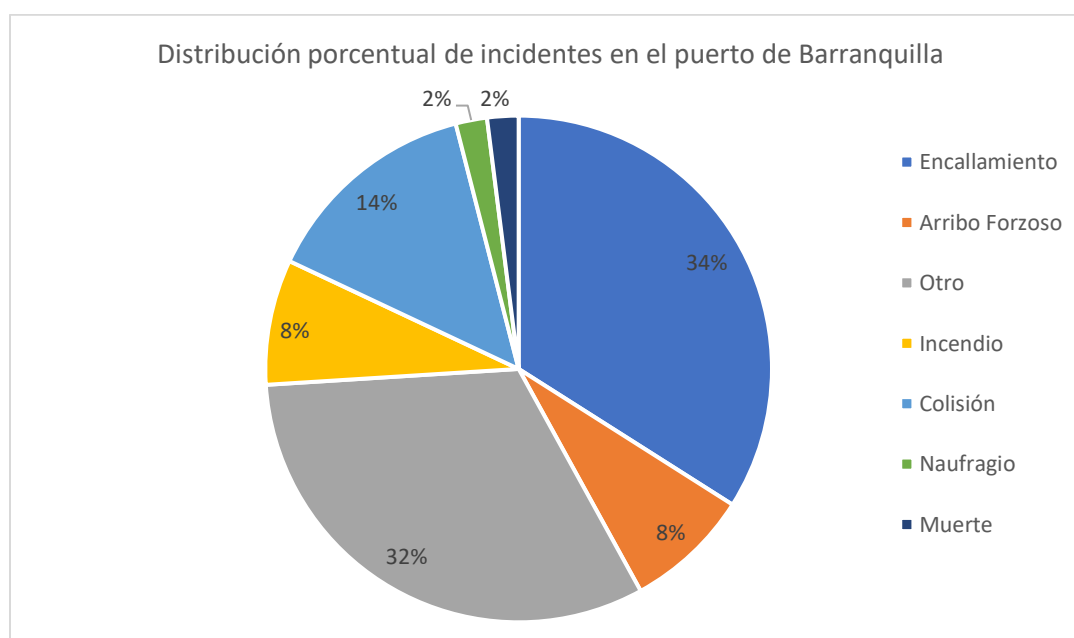
La información de accidentalidad para el sector portuario de Barranquilla se obtuvo a partir de los registros de la base de datos de la Dirección Marítima - Capitanía de Puerto de Barranquilla. La información entregada a través de la solicitud N°. 292019103856 con fecha 27 de mayo de 2019 muestra que se tienen registros de 50 siniestros catalogados en 7 categorías. Adicionalmente, se



realizó una búsqueda en los periódicos locales (Tabla 5-3) tanto para validar la información suministrada por DIMAR como para añadir registros a los que ya fueron categorizados y obtener información sobre las condiciones hidrometeorológicas presentes en el momento del incidente, esta información es relevante para la construcción de las curvas de vulnerabilidad. En la Figura 5-7 se muestran los resultados históricos correspondientes a los incidentes en el puerto.

*Tabla 5-3. Titulares con registros de incidentes en el puerto de Barranquilla*

Periódico	Fecha	Titular
Zona Cero	29-07-20	Dimar supervisa fase final de salvamento para desencallar buque en Bocas de Ceniza
Zona Cero	05-04-20	Remolcadores y Dimar rescataron buque en emergencia en Bocas de Ceniza
Zona Cero	18-02-20	En emergencia buque de contenedores en el sector de Bocas de Ceniza
Zona Cero	05-11-19	Buque tocó fondo y quedó encallado en la margen oriental del puerto de Barranquilla
Zona Cero	29-08-19	Buque averiado fue jalado desde Bocas hasta el puerto
El Heraldo	27-02-19	Dimar investiga emergencia de buque en Bocas de Ceniza
Zona Cero	16-01-19	Dimar investiga siniestro marítimo presentado con buque en el muelle de Palermo
El Heraldo	30-08-18	Se presentan 150 encallamientos al mes en el Río: Impala
Zona Cero	06-07-17	Canal duró 18 horas bloqueado por un buque
El Heraldo	14-11-16	Reportan incendio de un buque en Palermo
El Heraldo	12-03-13	Buque mercante se incendia en la entrada de Bocas de Ceniza
El Heraldo	24-03-12	Encalló buque tanquero en el Río Magdalena
El Heraldo	22-12-11	Nuevo encallamiento de buque en Bocas de Ceniza
El Heraldo	17-05-11	Se repite la historia de buques encallados en el Puerto de Barranquilla
El Heraldo	06-04-11	Después de 15 horas, desencallan buque en el Puerto de Barranquilla
El Heraldo	10-12-10	Barco perdió control y se estrelló en canal



*Figura 5-7. Distribución porcentual de incidentes en el puerto de Barranquilla*

Los datos suministrados no tienen información de la fecha del incidente ni detalles específicos como tipo de embarcación ni localización puntual del incidente; estos datos no son suficientes para determinar las condiciones puntuales en las que se desarrolló el incidente o para desarrollar un análisis estadístico de incidentes entre número total de movimientos por año debido a que no se tiene información certera sobre el total de incidentes.

## 5.2 Mesa de trabajo con expertos

Dentro del convenio realizado entre Cormagdalena y la Universidad del Norte “*Diagnóstico de línea base de condiciones hidromorfológicas y análisis de criterios para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de obras de navegabilidad para el Río Magdalena*” se realizó una mesa de trabajo el día 30 de mayo de 2019, en esta actividad se aplicó la metodología HAZOP con 31 asistentes los cuales fueron distribuidos heterogéneamente según su área de experticia en 4 grupos (Figura 5-8).

A cada grupo se le entregó un mapa del sector de estudio en el cual debían hacer las anotaciones respectivas sobre los principales factores operativos de las embarcaciones, las zonas con mayores restricciones y las épocas del año en las cuales se presentan restricciones por calado para el ingreso y salida de embarcaciones. Las principales conclusiones se listan a continuación:

- Evolución morfológica considerable en el sector fluvial del canal navegable, los eventos de caudales extremos aceleran procesos de cambio morfológico lo cual tiene relación directa con el alineamiento del canal y el calado operativo. Se necesita preparación por parte de todos los actores de la navegación en el río el corto tiempo.
- Se requiere de monitoreo exhaustivo en la zona costera y fluvial de las condiciones hidrometeorológicas, la estratificación en la desembocadura tiene influencia en los procesos de floculación y sedimentación lo cual repercute en el calado operativo en los primeros kilómetros del río.
- El primer trimestre del año las condiciones meteomarinas restringen la navegación en el canal de aproximación y en el sector del canal exterior. Las embarcaciones de menor porte son las mas susceptibles frente al forzamiento por oleaje mientras que los buques portacontenedores presentan un mayor riesgo de deriva por viento.
- No se dispone de una estación para la medición de caudal aparte de la estación Calamar en la zona de influencia de la desembocadura.
- Existen procesos físicos complejos en la desembocadura de interacción fluvial y costera. Se deben estudiar más los procesos de turbidez, cuña salina, y la estacionalidad de la erosión-sedimentación de fondo. Se debe tener en cuenta la influencia del fenómeno de El Niño y La Niña.
- Las pilas del puente Pumarejo están aumentando los procesos de sedimentación en las sociedades portuarias aguas abajo, esto repercute en el calado operativo para las sociedades portuarias en entre el K20 y el K22.
- Se requiere de la integración de modelos numéricos robustos que ayuden a la navegación a través de simulaciones .

- Por el momento no es viable el tránsito constante de embarcaciones de tipo PANAMAX o superiores debido a las restricciones de calado operativo que maneja el puerto.

Los resultados obtenidos como los presentados en la Figura 5-9 y Figura 5-10 permitieron validar la identificación de caracterización de geometría hidráulica crítica presentada en el Capítulo 6.4.1, adicionalmente permitieron la generación de las curvas de severidad presentadas en el Capítulo 7.1 las cuales son respuesta de la embarcación frente los escenarios que se presentan en el sector. Se busca determinar así si una embarcación puede o no ingresar al canal navegable y estimar que tan peligroso puede ser su recorrido en el río según los parámetros mencionados anteriormente.



*Figura 5-8. Reuniones de expertos para la identificación de factores relevantes a la navegación en el sector de estudio*



*Figura 5-9. Socialización de resultados de la mesa de trabajo*



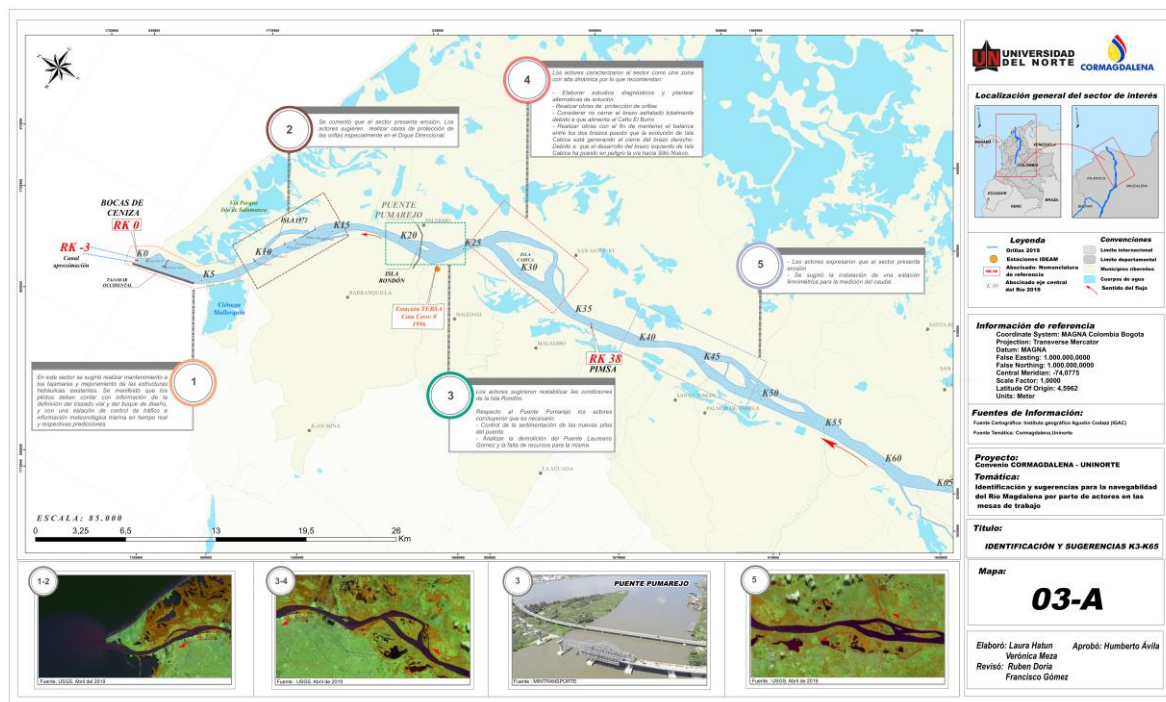


Figura 5-10. Mapa con comentarios realizados por expertos en navegación

### 5.3 Identificación de embarcaciones de análisis

El sector marítimo de Barranquilla atiende principalmente a embarcaciones de tipo Supramax y de tipo Handymax y Handysize (Feeder) e inferiores. En el estudio para la elaboración de “*Estudios y diseños de mejoramiento en la infraestructura y navegación del canal de acceso al puerto de Barranquilla desde la zona de aproximación marina hasta el sector de PIMSA*” (INVIAS, 2020), se realizó una caracterización de las embarcaciones que arriban al puerto de Barranquilla en función de las características geométricas de las mismas. En la Tabla 5-4, Tabla 5-5 y Tabla 5-6 se presenta la caracterización de las embarcaciones arribadas.

Tabla 5-4. Caracterización de eslora y manga para embarcaciones arribadas al puerto de Barranquilla. Fuente: (INVIAS, 2020)

Tipo de buque	Manga (m)	Eslora (m)
Tanquero	30 - 34.99	180 - 189
Granelero	30 - 34.99	~190m
Portacontenedor	26 - 29.99	170 - 179
Carguero general	30 - 34.99	180 - 189
Valor de referencia	32	190

Tabla 5-5. Porcentaje de aprobación de calados mayores a 10 m según tipo de embarcación. Fuente: (INVIAS, 2020)

Calados autorizados mayores a 10 m										
Calado autorizado (calado buque / calado autorizado)	Buques cargueros generales y multi - propósito		Buques Porta - contenedores		Buques Graneleros		Buques Tanqueros		Total Buques	
> 0.9	25	20.8%	17	14.2%	69	57.5 %	9	7.5%	120	11.7 %
0.7 - 0.89	147	27.5%	160	29.9%	127	23.7 %	101	18.9%	535	52.1 %
0.5 - 0.69	115	37.6%	75	24.5%	71	23.2 %	45	14.7%	306	29.8 %
< 0.5	51	78.5%	2	3.1%	8	12.3 %	4	6.2%	65	6.3%

Tabla 5-6. Porcentaje de aprobación de calados inferiores a 10 m según tipo de embarcación. Fuente: (INVIAS, 2020)

Calados autorizados de 9,5 m a 9,9 m										
Calado autorizado (calado buque / calado autorizado)	Buques cargueros generales y multi - propósito		Buques Porta - contenedores		Buques Graneleros		Buques Tanqueros		Total Buques	
> 0.9	36	18.8%	62	32.3%	79	41.1%	15	7.8%	192	14.9%
0.7 - 0.89	125	17.1%	277	37.9%	182	24.9%	146	20.0%	730	56.7%
0.5 - 0.69	51	17.5%	94	32.3%	94	32.3%	52	17.9%	291	22.6%
< 0.5	29	39.2%	14	18.9%	29	39.2%	2	2.7%	74	5.7%

Las embarcaciones analizadas están en función principalmente de la arquitectura de este y del tipo de carga que manejan. La identificación realizada sobre las embarcaciones que arriban al puerto muestra que la embarcación más representativa en cuanto a arribos y porcentaje de carga movilizada es la SUPRAMAX, en la Tabla 5-7 se presentan las características de esta:

Tabla 5-7. Características de las embarcaciones de análisis

Características	Supramax
Eslora (m)	190
Manga (m)	32.2
Calado SSW a plena carga (m)	11.6
Velocidad max. (nudos)	10
Tonelaje Peso Muerto	52025
Sector de navegación	K0 – K20+650



Figura 5-11. M/N “EQUINOX DAWN” IMO 9229673. (MarineTraffic, 2020)

## 5.4 Análisis probabilístico de variables hidrometeorológicas

Tal como se muestra en diferentes guías de diseño de canales de aproximación y canales interiores, los principales variables naturales que condicionan la navegación son: la profundidad, el viento, el oleaje, la carrera de marea, velocidades y la geometría hidráulica (profundidad). El análisis de riesgo en la actividad de navegación requiere de caracterizar estadísticamente estas variables con el fin de determinar los valores esperados dada una época del año. A continuación, se presenta el análisis estadístico y matemático a las variables hidrometeorológicas presentes y definidas anteriormente.

### 5.4.1 Geometría hidráulica

A partir de los levantamiento batimétricos realizados por DIMAR en el sector portuario entre 2006 y 2018 se obtuvieron un total de 156 levantamientos batimétricos completos entre Bocas de Ceniza (K0) y Puente Pumarejo (K21+825). Se calculó la geometría hidráulica según las dimensiones del canal navegable presentadas en la Tabla 5-1, este cálculo se realizó para secciones transversales espaciadas cada 100 metros. La geometría hidráulica es una aproximación unidimensional a las condiciones geomorfológicas del río. El coeficiente  $j$  usado en la ecuación se determinó en 0.5, el cual ha sido validado en diferentes estudios para ríos aluviales a nivel mundial. Se definió la geometría hidráulica crítica  $\varepsilon_c$  como el valor para el cual no se cumplen los criterios de navegabilidad definidos por DIMAR y Cormagdalena.

$$\varepsilon = \frac{B^j}{h_0} \quad (20)$$

Entre K0+000 y K2+000

$$\varepsilon_c = \frac{B^j}{h_0} = \frac{200^{0.5}}{12} = 1.1785$$

Entre K2+100 y K21+800

$$\varepsilon_c = \frac{B^j}{h_0} = \frac{150^{0.5}}{11.40} = 1.0743$$

En la Figura 5-12 se presentan los resultados de geometría hidráulica calculada según los levantamientos batimétricos.

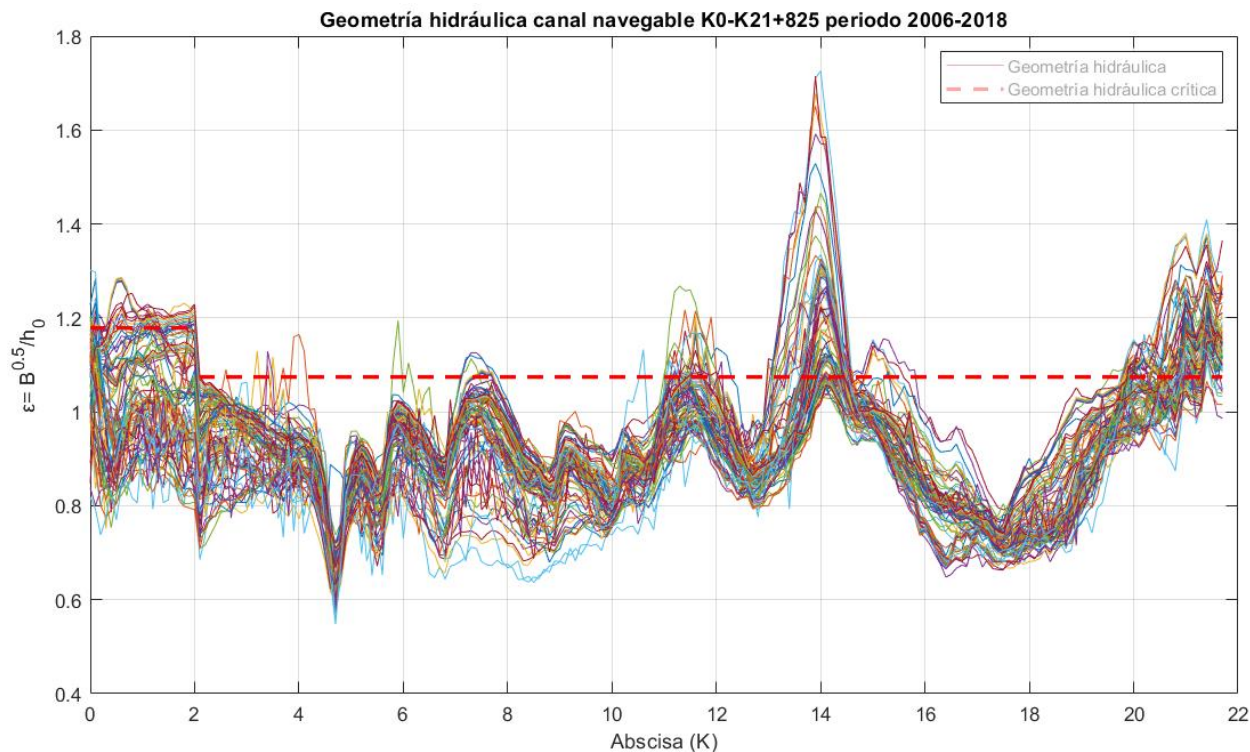


Figura 5-12. Geometría hidráulica del canal navegable calculado a partir de levantamientos batimétricos 2006-2018

Los resultados de geometría hidráulica permiten representar las características morfológicas del canal navegable, tal como se muestra en la Figura 5-12 entre el K0 al K2 la geometría hidráulica del canal presenta altas fluctuaciones a lo largo de todo el registro. Cerca del 25% del tiempo, el valor de geometría hidráulica supera la condición crítica evidenciando el proceso de sedimentación persistente en la zona de la desembocadura debido principalmente a los procesos de floculación de sedimentos generados por la interacción del alto transporte de sedimentos del río y la intrusión de la cuña salina lo cual precipita y deposita grandes cantidades de sedimentos en la zona (Higgins et al., 2016), aunque la condición ha mejorado con las obras de dragado que se vienen ejecutando constantemente desde 2017.

Igualmente se evidencia como los registros de geometría disminuyen aguas arriba del K2 con mínimos hacia el K4+500 y K5 en los cuales los espolones 1 y 2 adosados al Dique Boyacá profundizan el cauce. Entre el K11 y el K14+500 se evidencian unos procesos de sedimentación constante que comprometen el calado de diseño del canal navegable, es el segundo sector más

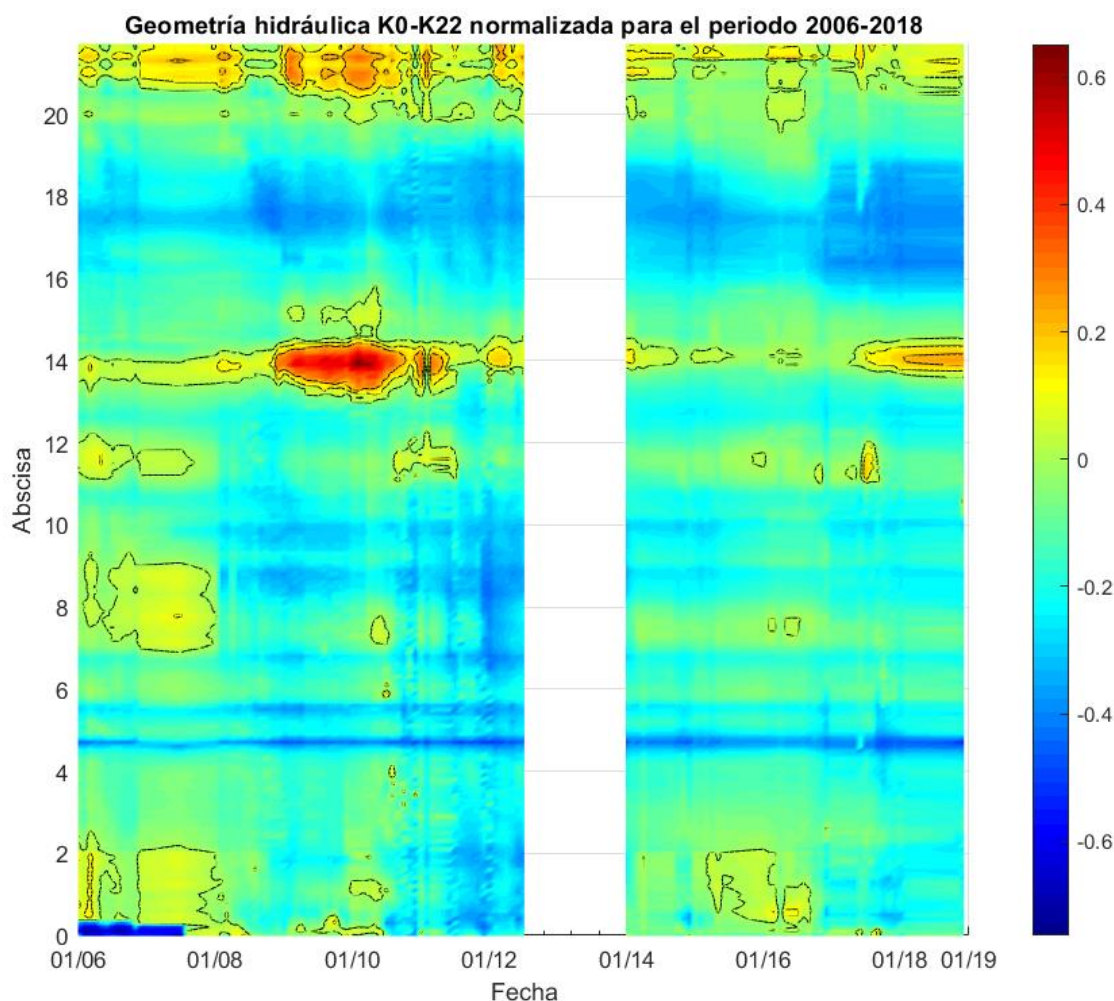
restrictivo para las embarcaciones y segundo sector donde más se realizan labores de dragado (CIIC, 2020; Findeter & Cormagdalena, 2020). En este segundo sector el río presenta su ancho máximo en el sector de estudio y según reporta Cormagdalena se presenta la formación de barras de sedimento las cuales son monitoreadas constantemente. El tercer sector con valores de geometría hidráulica por encima del valor crítico se presenta entre el K20 y el K22 con restricciones a la navegación por pocas profundidades mantenidas durante casi todo el año.

Para obtener los datos faltantes de geometría hidráulica se utilizó el modelo de entropía dependiente del tiempo. Se definió como geometría hidráulica de inicio y fin los datos calculados anteriormente para un intervalo de tiempo de un año. Para la calibración del modelo se utilizó el método de Montecarlo para generar valores aleatorios del coeficiente  $K$  con un rango inicial entre -10 y 10 el cual ha sido reportado como intervalo en el cual se han obtenido resultados coherentes para el modelo (Mao & Chen, 2018; Singh, 2014). Para el periodo 06/2012 a 12/13 no se obtuvieron levantamientos batimétricos por lo cual no se pudo aplicar el modelo de entropía para este intervalo de tiempo al superarse el margen de un año. Para identificar los periodos de tiempo y la espacialidad en la cual se presentaron condiciones desfavorables para la navegación se calculó la geometría hidráulica normalizada  $\varepsilon^*$  para todos los registros según la Ecuación (21) respecto a la geometría hidráulica crítica, donde la desviación estándar  $\sigma$  es igual a 1. Esta geometría normalizada permite caracterizar el sector de estudio bajo los mismos parámetros aun si se tiene presente dos geometrías hidráulicas críticas diferentes.

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\sigma} \quad (21)$$

Los resultados presentados en la Figura 5-13 muestran la presencia de zonas críticas a lo largo del canal navegable, las zonas contenidas dentro de las isolíneas representan sectores en los cuales la geometría hidráulica normalizada es superior a 0, se evidencia la sedimentación entre el K0 al K2, en el K14 y entre el K20 al K22 se mantienen valores de geometría hidráulica por encima de valor crítico en gran parte de los resultados.





*Figura 5-13. Diagrama de Hovmöller para geometría hidráulica normalizada con resultados del modelo de entropía*

#### 5.4.2 Caracterización hidrológica

La caracterización hidrológica requiere de la recopilación de información secundaria para el cálculo estadístico de los caudales y niveles mensuales del río. Para tal fin se procedió a la descarga de datos procedentes de las estaciones IDEAM de Calamar para caudales y TEBSA para niveles en el sector de estudio. El procesamiento estadístico mostrado a continuación incluye el análisis de distribuciones de probabilidad mensual de niveles, análisis de frecuencia de niveles excedidos, curva de correlación Caudal-Nivel y análisis de frecuencia de eventos máximos y mínimos.

En la Tabla 5-8 se presenta los datos de las estaciones usadas para la identificación de caudales y niveles en el río.

Tabla 5-8. Resumen de información de estaciones IDEAM para niveles y caudales

Estación	Cero de mira (m.s.n.m.)	Periodo registro (años)	Abscisa	Ubicación
TEBSA (A)	0	1996- Activa	K23+000	10.94N, 74.76W
Calamar (M)	-0.2	1967- Activa	K115+000	10.25N, 74.91W

El río Magdalena tiene un comportamiento hidrológico con tendencia bimodal con valores máximos en los períodos junio-julio y octubre-noviembre, y valores mínimos en febrero-abril y agosto-septiembre. En la Figura 5-14 se presenta la curva de frecuencia de niveles excedidos, que muestran el porcentaje de tiempo en el cual el nivel es igualado o excedido. Esta gráfica se usa para caracterizar el hidrograma del río a partir del comportamiento medio del registro histórico multianual a partir de datos medidos. La variación en los registros se debe principalmente a la incidencia de la Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT) sobre el territorio colombiano y repercute en la magnitud y frecuencia de las precipitaciones sobre la cuenca del río (Poveda, 2004). Los niveles del río también están ligados a la ocurrencia del ENOS (El Niño Oscilación Sur) El niño fase cálida o La Niña fase fría en las cuales se evidencia una reducción o aumento significativo en las precipitaciones respectivamente, se destacan los eventos La Niña de 2010-2011 con caudales elevados mantenidos y provocó el desbordamiento del río en el Canal del Dique (Euscategui & Hurtado, 2011), y El Niño 2015-2016 en el cual la escasa precipitación conllevó a sequías a lo largo del Caribe colombiano y bajos niveles en el río afectando a poblaciones riverleñas.

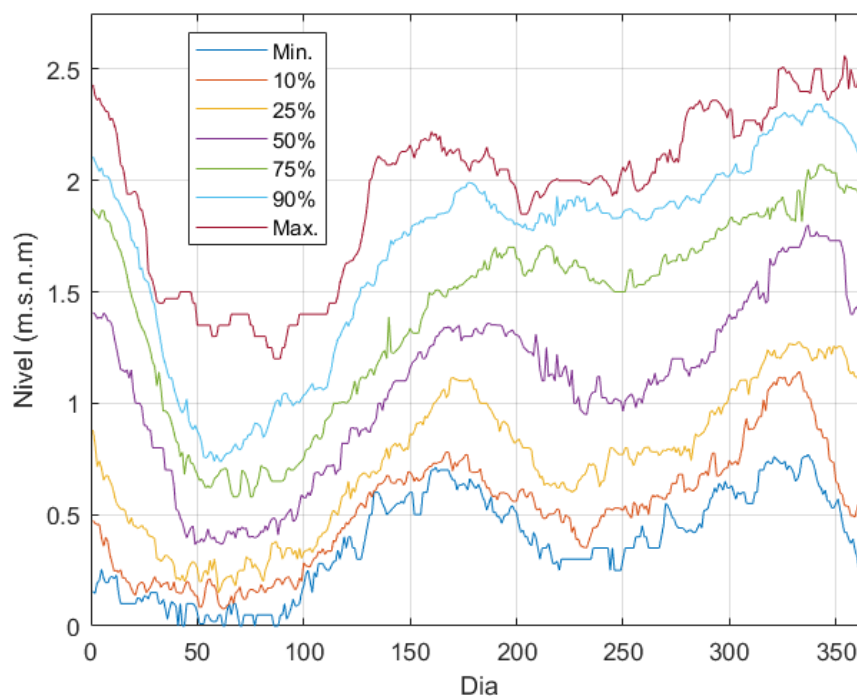


Figura 5-14. Curva frecuencia de niveles excedidos Estación TEBSA

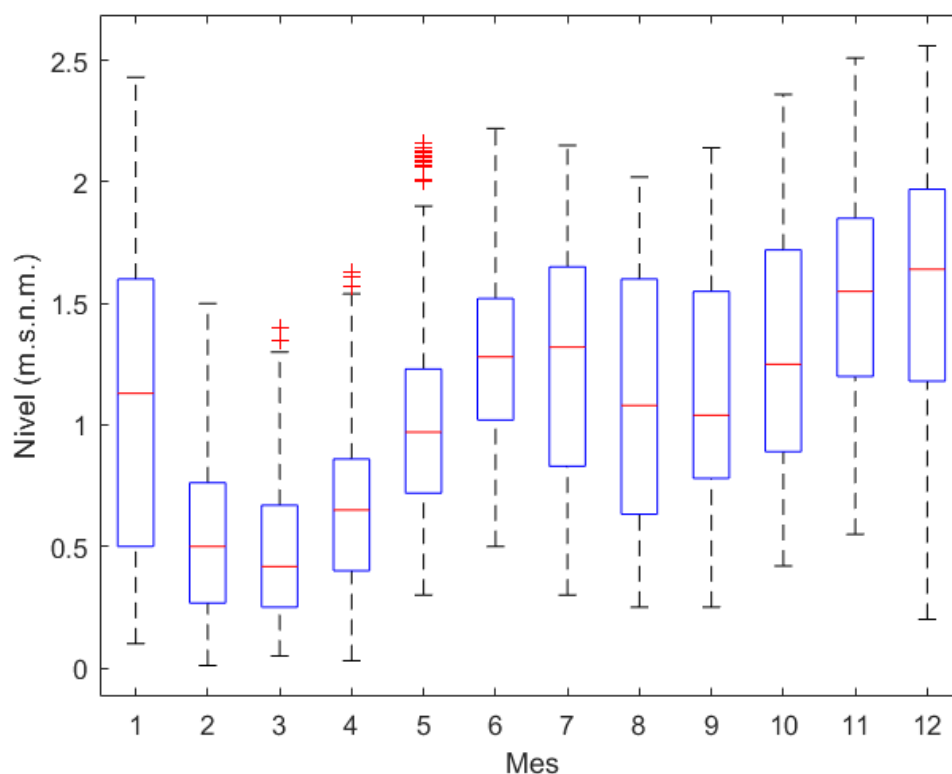


Figura 5-15. Boxplot de niveles mensuales Estación TEBSA

El río tiene un caudal medio registrado en la estación Calamar de 7400 m<sup>3</sup>/s aproximadamente dentro de su registro desde 1967. Los valores máximos y mínimos por mes varían en función del mes. En la Tabla 5-9 se presenta el análisis multianual de niveles y caudales para las dos estaciones hidrológicas analizadas.

Tabla 5-9. Análisis de niveles y caudales mínimos, promedio y máximos para estación TEBSA (nivel) y Calamar (caudal)

Mes	Nivel del río (m.s.n.m.)			Caudal (m <sup>3</sup> /s)		
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
Enero	0.10	1.08	2.43	2326	6980	13844
Febrero	0	0.56	1.50	1900	4540	10074
Marzo	0	0.47	1.40	1520	4230	8434
Abril	0.03	0.66	1.63	2201	5133	9951
Mayo	0.30	1.04	2.16	3402	7055	12892
Junio	0.50	1.28	2.22	4667	8385	14475
Julio	0.30	1.24	2.15	3688	8071	14425
Agosto	0.25	1.13	2.02	3439	7360	13063
Septiembre	0.2	1.12	2.14	3214	7612	13196
Octubre	0.42	1.30	2.36	3699	8727	13920
Noviembre	0.55	1.54	2.51	4594	10148	16913
Diciembre	0.20	1.54	2.56	2916	10100	16913



Los registros de niveles se ajustaron a distribuciones de probabilidad Weibull y Log normal principalmente. Este ajuste se realizó a través de la prueba de bondad de ajuste teniendo en cuenta los resultados de valor  $p$ , estadístico de Anderson Darling y ajuste visual de los datos. Las distribuciones se presentan en la Tabla 5-10 y Figura 5-16.

*Tabla 5-10. Resumen de ajuste de distribuciones de probabilidad para datos de nivel del río Estación TEBSA*

Mes	Distribución	Factores	Valor	Valor p	AD
Enero	Weibull	Forma	1.99166	0.125	0.545
		Escala	1.21626		
Febrero	Weibull	Forma	1.80033	0.186	0.522
		Escala	0.63583		
Marzo	Log normal	Ubicación	-0.93792	0.318	0.409
		Escala	0.67596		
Abril	Log normal	Ubicación	-0.50861	0.194	0.494
		Escala	0.45098		
Mayo	Log normal	Ubicación	-0.01809	0.825	0.216
		Escala	0.35323		
Junio	Log normal	Ubicación	0.20254	0.368	0.383
		Escala	0.32005		
Julio	Weibull	Forma	3.21469	0.217	0.489
		Escala	1.3978		
Agosto	Log normal	Ubicación	0.00161	0.352	0.391
		Escala	0.51603		
Septiembre	Log normal	Ubicación	0.01558	0.749	0.24
		Escala	0.45641		
Octubre	Log normal	Ubicación	0.19483	0.605	0.282
		Escala	0.38861		
Noviembre	Weibull	Forma	3.98893	0.322	0.25
		Escala	1.72334		
Diciembre	Weibull	Forma	3.30501	0.25	0.317
		Escala	1.71969		

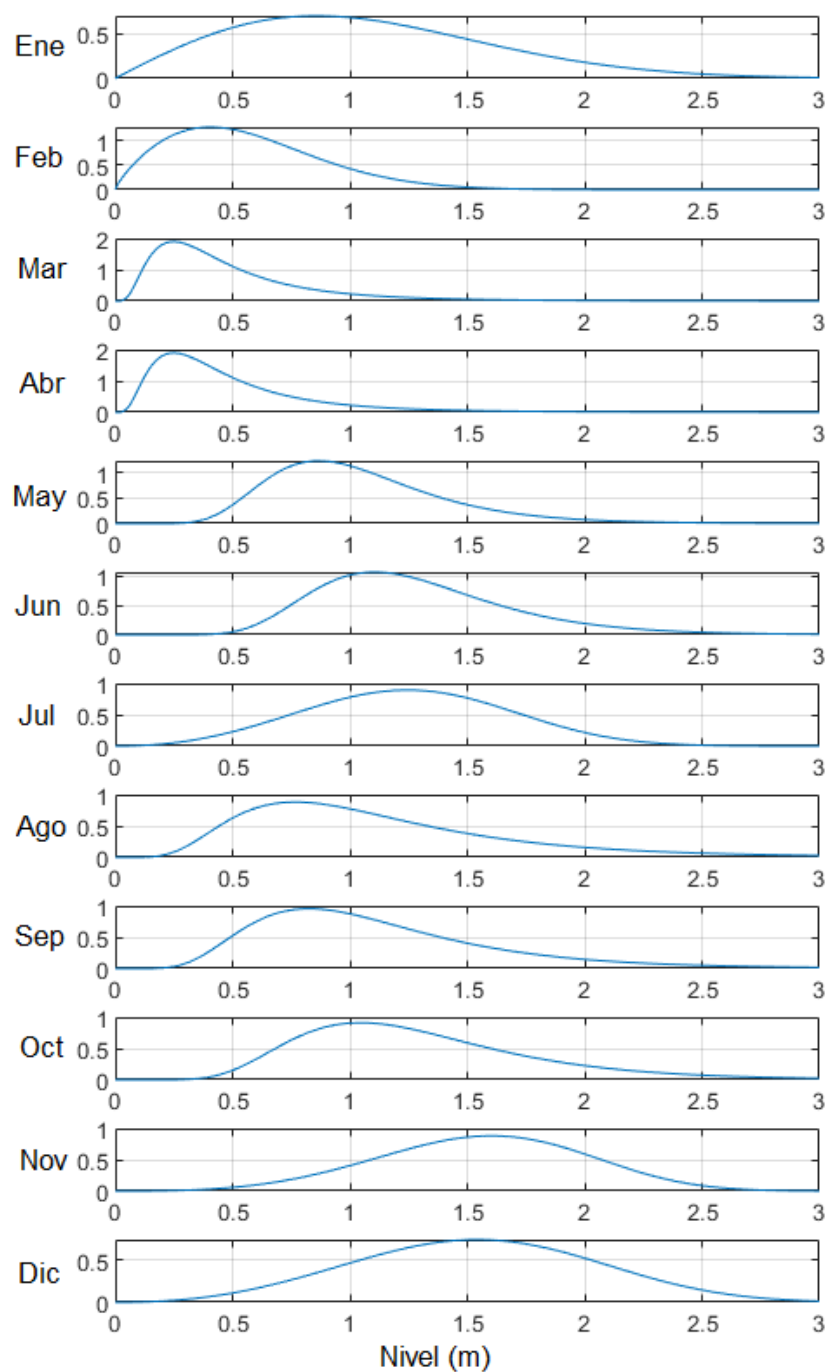


Figura 5-16. Distribuciones de probabilidad por mes estación TEBSA

Para la modelación hidrodinámica se requiere de correlacionar los datos de caudal y nivel para una estación con el fin de calibrar el modelo. Para tal fin se realizó una correlación de datos caudal recolectados por el Observatorio del Río Magdalena y Nivel en la estación TEBSA. En la Figura 5-17 se presenta la curva HQ junto con la ecuación de correlación, esta regresión tiene un  $R^2$  de 0.9916 (Observatorio del Río Magdalena - Universidad del Norte, 2020). A partir de la correlación planteada se caracterizó la variación mensual de caudales tal como se presenta en la Figura 5-18.

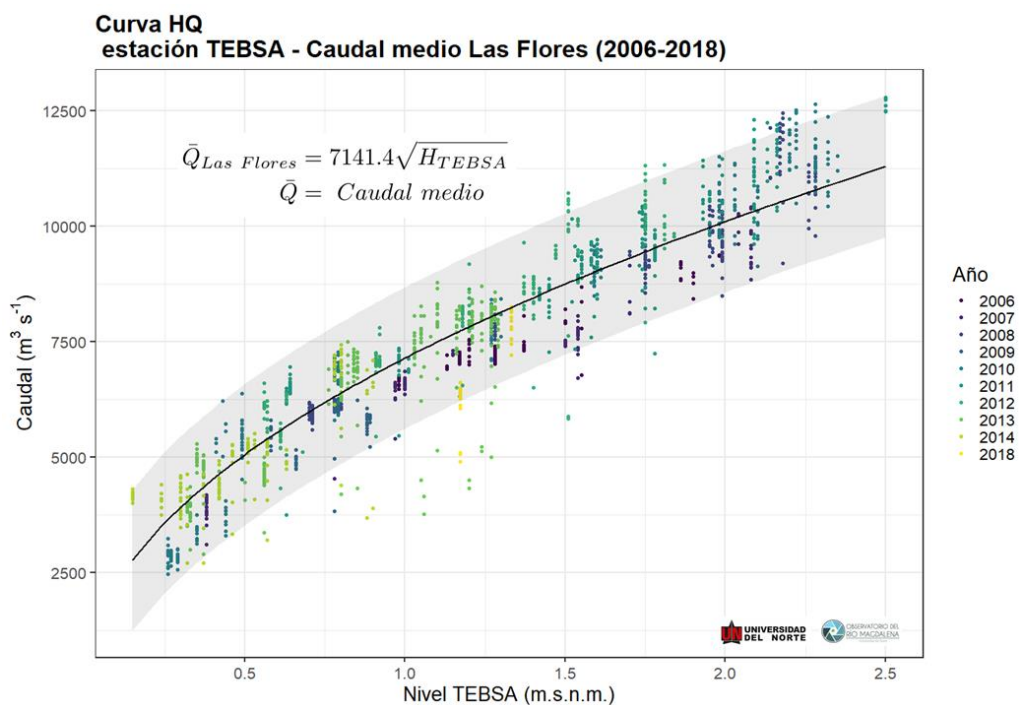


Figura 5-17. Regresión datos de nivel estación TEBSA y caudal Las Flores. (Observatorio del Río Magdalena - Universidad del Norte, 2020)

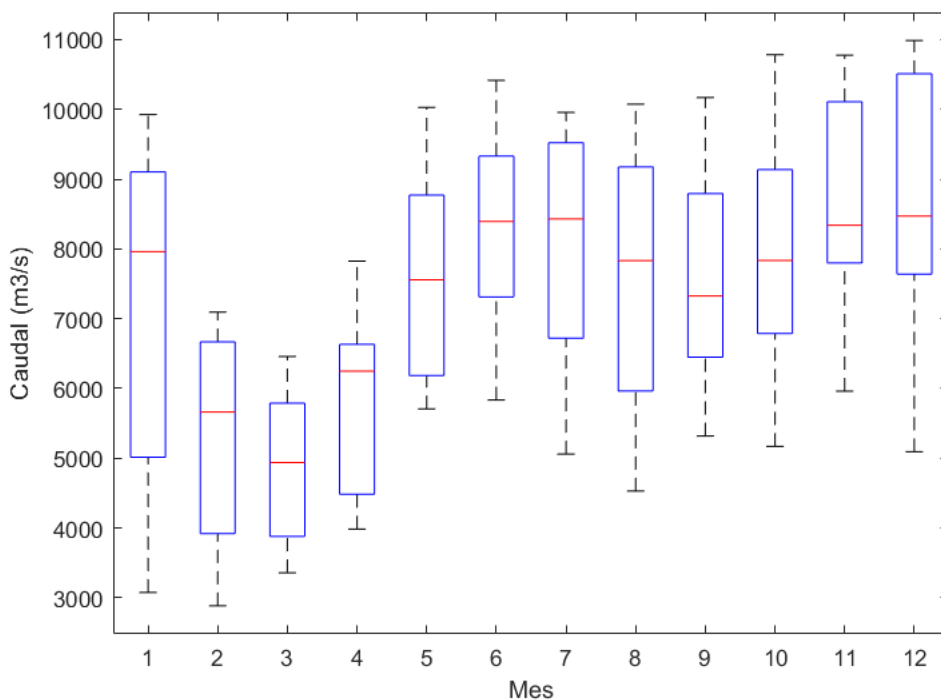


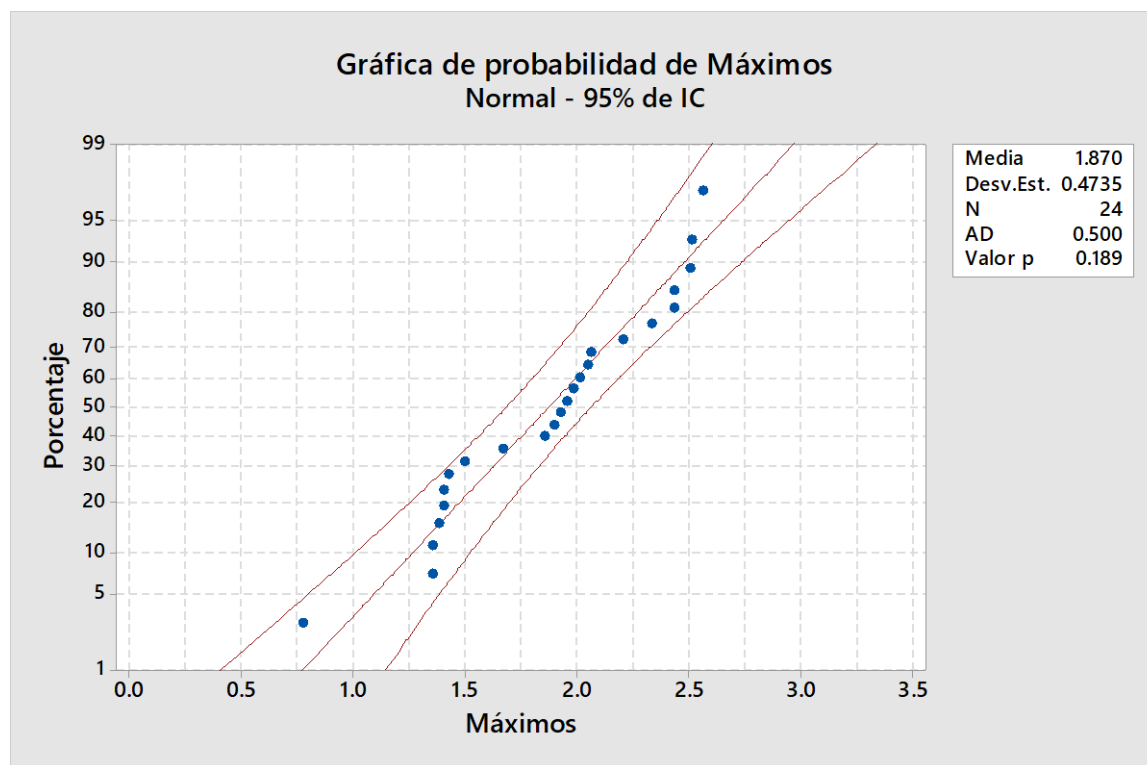
Figura 5-18. Boxplot de caudales mensuales estimados estación TEBSA

A partir de los registros se procedió a realizar el análisis de frecuencia de máximos para niveles del río. Los resultados presentados en la Tabla 5-11 y Figura 5-19

que para un periodo de retorno de 2 años el nivel ya es superior a los 1.85 metros, lo cual representa un caudal aproximado de 10000 m<sup>3</sup>/s, en el cual ya se presentan restricciones de navegación.

*Tabla 5-11. Ajuste de valores máximos anuales de nivel estación TEBSA*

Porcentaje	Nivel máximo (m)	P	T
1	0.768542	0.99	1.01
5	1.09124	0.95	1.05
10	1.26327	0.9	1.11
20	1.47159	0.8	1.25
50	1.87012	0.5	2.00
90	2.47696	0.1	10.00
95	2.64899	0.05	20.00
99	2.97169	0.01	100.00



*Figura 5-19. Ajuste de valores máximos anuales de nivel estación TEBSA*

De igual forma se realizó el análisis de frecuencia de valores mínimos de niveles del río en la estación TEBSA. Los resultados de frecuencia de máximos y mínimos son insumos para la generación de las curvas de probabilidad en el Capítulo 7.1.3

Tabla 5-12. Ajuste de valores mínimos anuales de nivel estación TEBSA

Porcentaje	Nivel mínimo (m)	P	T
1	0.003178	0.01	100.00
5	0.016217	0.05	20.00
10	0.033312	0.1	10.00
20	0.070551	0.2	5.00
50	0.219153	0.5	2.00
80	0.508856	0.8	1.25
90	0.728009	0.9	1.11
95	0.947161	0.95	1.05

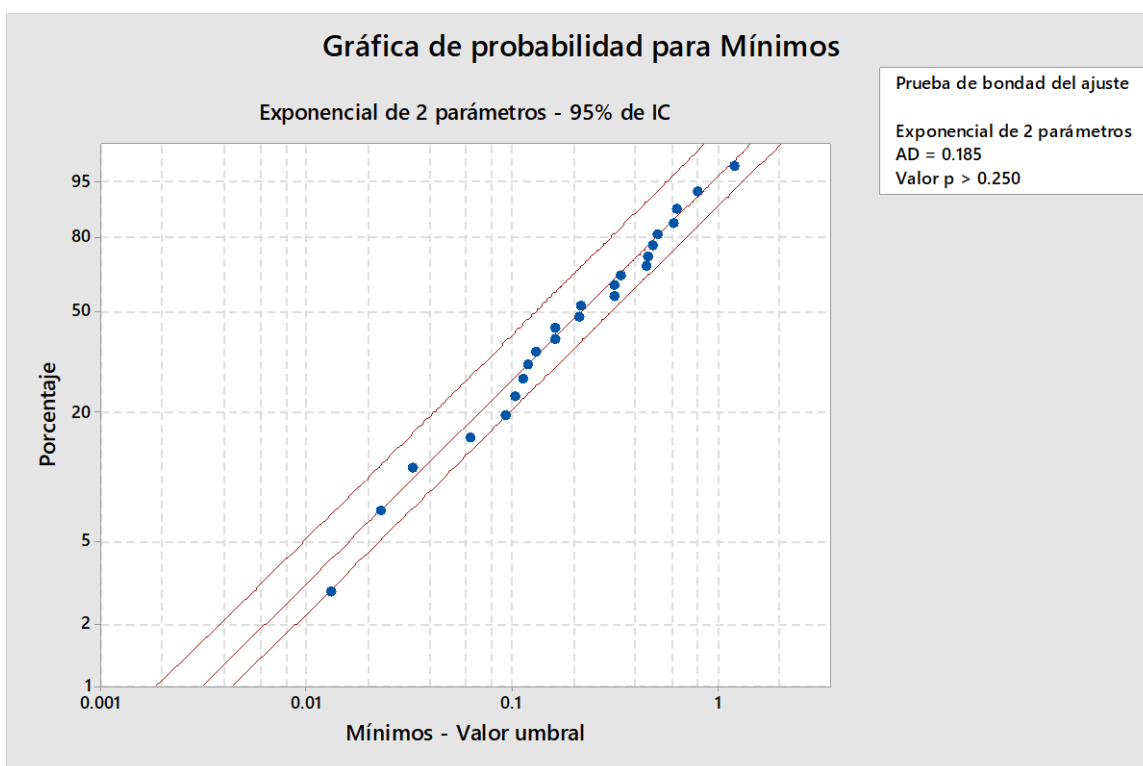


Figura 5-20. Ajuste de valores mínimos anuales de nivel estación TEBSA

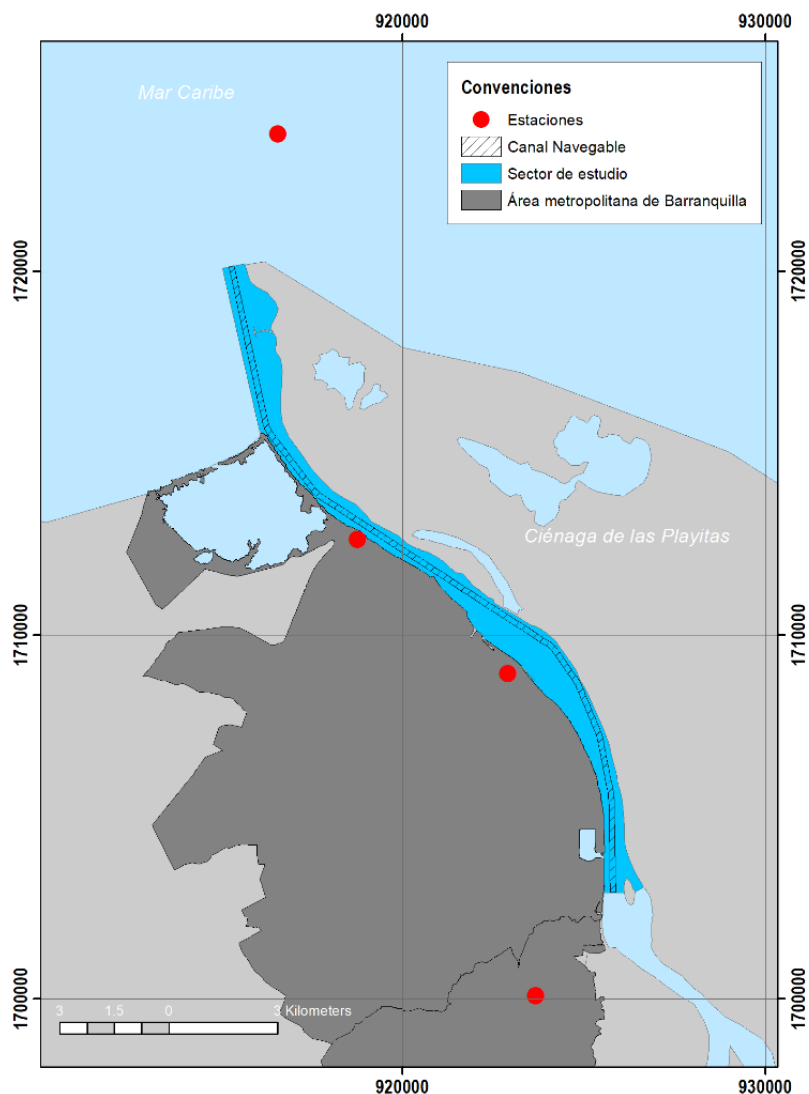
#### 5.4.3 Viento

La magnitud y dirección del viento, así como su variación espacial tiene una gran influencia en el análisis de riesgo cuando se trabaja con un dominio espacial. Para esta caracterización se procedió a recopilar información de velocidad del viento y dirección del viento en grados en fuentes secundarias. Dentro de la zona continental se obtuvo información de 3 estaciones propiedad del IDEAM, para la zona costera se utilizó la herramienta APPMAR 1.0 desarrollada por Rivillas-ospina et al., (2020) la cual descarga y utiliza información de la base de datos NOAA-WW3 para el cálculo estadístico de parámetros de clima marítimo en función a las estaciones climáticas, a pesar de que el sector de

estudio se encuentra en una zona tropical, la información descargada solo se muestra estacional. Dentro de la plataforma se seleccionó un punto en la zona próxima a la desembocadura para la descarga de información asociada a esa ubicación; para la presente tesis solo se utilizó el módulo de descarga de información. En la Tabla 5-13 se presenta la información asociada a las fuentes secundarias y en la Figura 5-21.

*Tabla 5-13. Resumen de información de estaciones IDEAM para niveles y caudales*

Estación	Frecuencia	Periodo registro (años)	Ubicación
Boya Virtual	3 h	1973-2016	11.17N, 74.83W
Las Flores	1 h	2006-Actual	11.04N, 74.82W
Escuela Naval	10 min	2014-Actual	11.01N, 74.78W
Ernesto Cortissoz	2 min	2005-Actual	10.92N, 74.78W



*Figura 5-21. Localización de las estaciones de medición de viento para el sector de estudio*

En el sector de estudio el viento predomina a lo largo del año en dirección  $45^{\circ}$ - $75^{\circ}$  (NE-NEE) en las estaciones de Las Flores, Escuela Naval y Boya Virtual, la estación Ernesto Cortissoz debido a que registro los datos de forma analógica solo se presentan datos según los puntos cardinales tiene predominancia en la dirección  $0^{\circ}$  (N) y  $45^{\circ}$  (NE) principalmente. La velocidad en la zona de estudio varía principalmente a medida que el viento ingresa de la zona costera hacia la parte continental debido principalmente al efecto de rugosidad que ejerce la plataforma continental y la variación tanto topográfica como de edificaciones presentes las cuales influyen tanto en dirección como en velocidad.

La velocidad en la estación Boya Virtual en condiciones normales varía entre 10 m/s y 15 m/s en promedio en entre diciembre a febrero (época seca) y marzo a mayo, en el segundo semestre del año las velocidades disminuyen encontrándose el mínimo entre septiembre a noviembre (época húmeda) con velocidades inferiores a 10 m/s. A partir de los datos de la Boya virtual se presenta una reducción aproximada del 35% en la velocidad para la estación Las Flores y del 60% para las estaciones Escuela Naval y Ernesto Cortissoz a lo largo del año.

En la Figura 5-22, Figura 5-24, Figura 5-26 y Figura 5-28 se presentan las rosas de vientos por trimestres y en la Figura 5-23, Figura 5-25, Figura 5-27 y Figura 5-29 se presentan los gráficos de probabilidad conjunta dirección-velocidad por trimestre del año

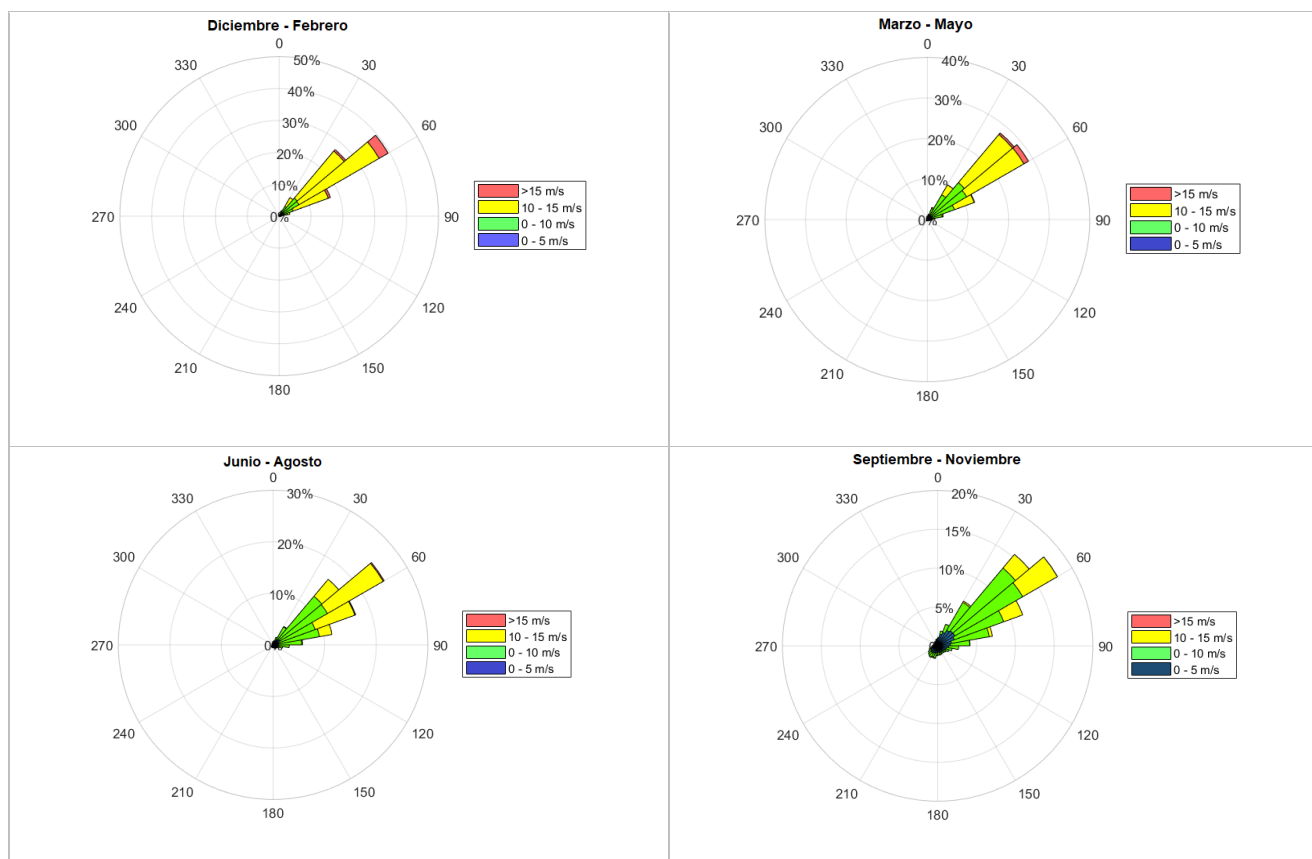


Figura 5-22. Dirección del viento por trimestre según registros Boya Virtual

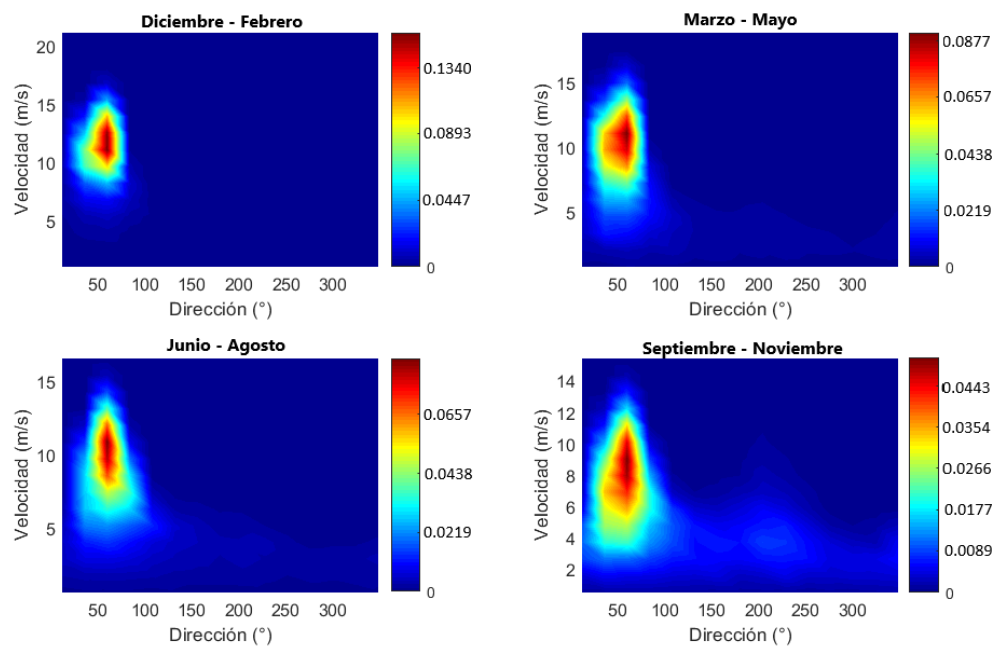


Figura 5-23. Probabilidad conjunta dirección y velocidad del viento Boya Virtual

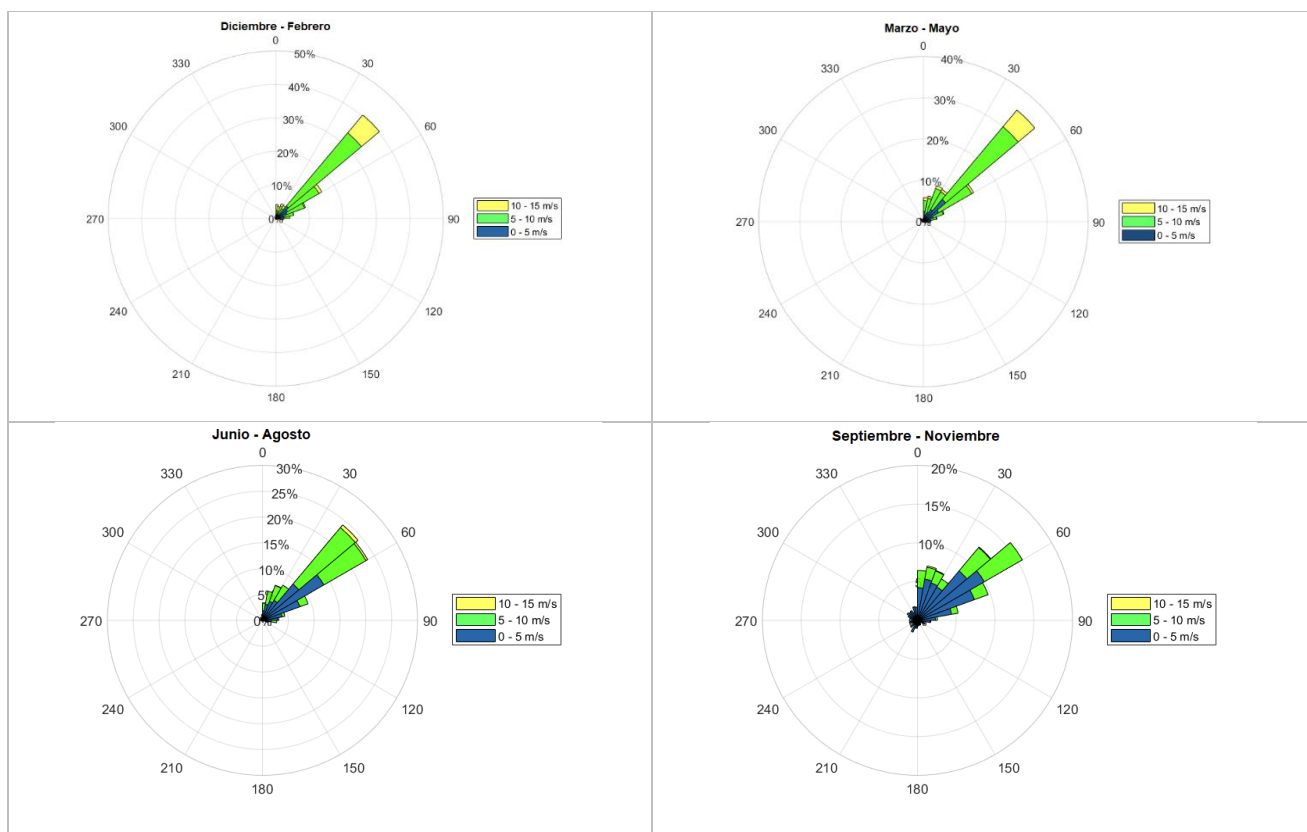


Figura 5-24. Dirección del viento por trimestre según registros estación Las Flores



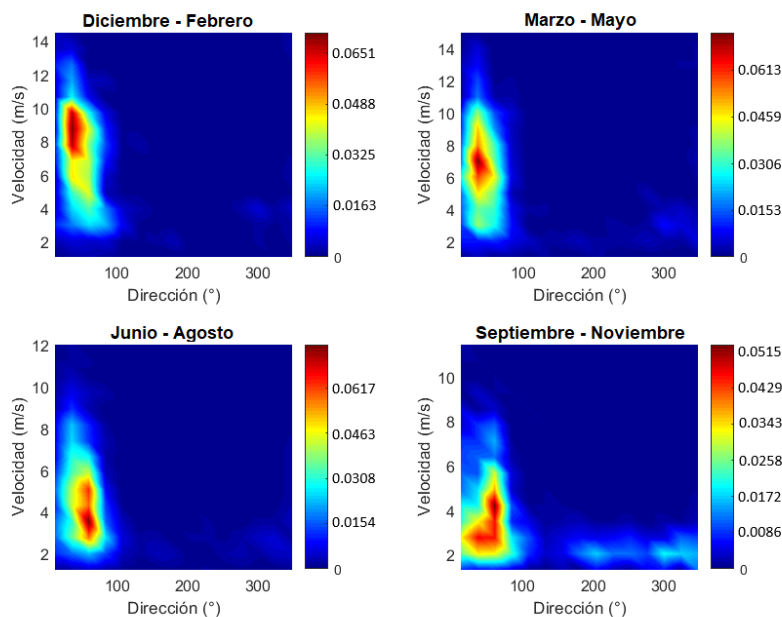


Figura 5-25. Probabilidad conjunta dirección y velocidad del viento Estación Las Flores

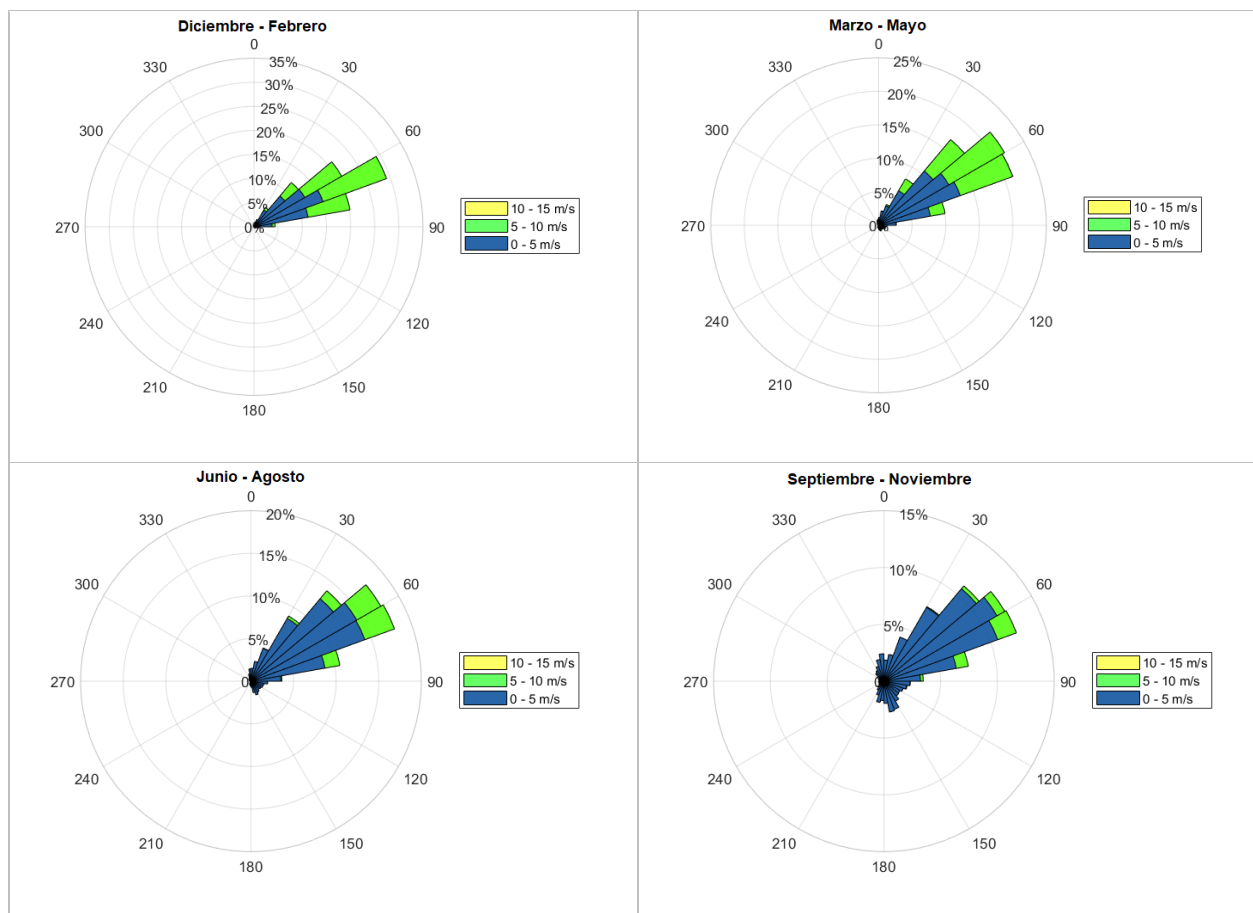


Figura 5-26. Dirección del viento por trimestre según registros estación Escuela Naval

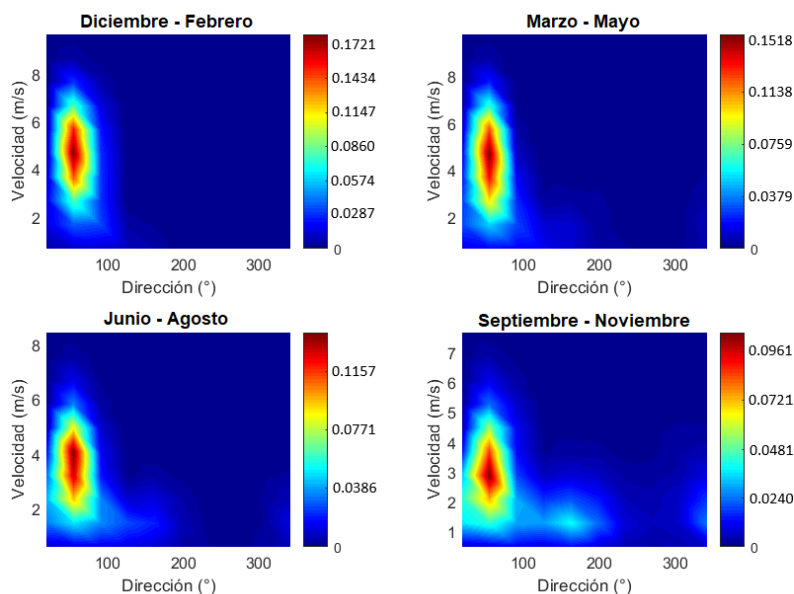


Figura 5-27. Probabilidad conjunta dirección y velocidad del viento Estación Escuela Naval

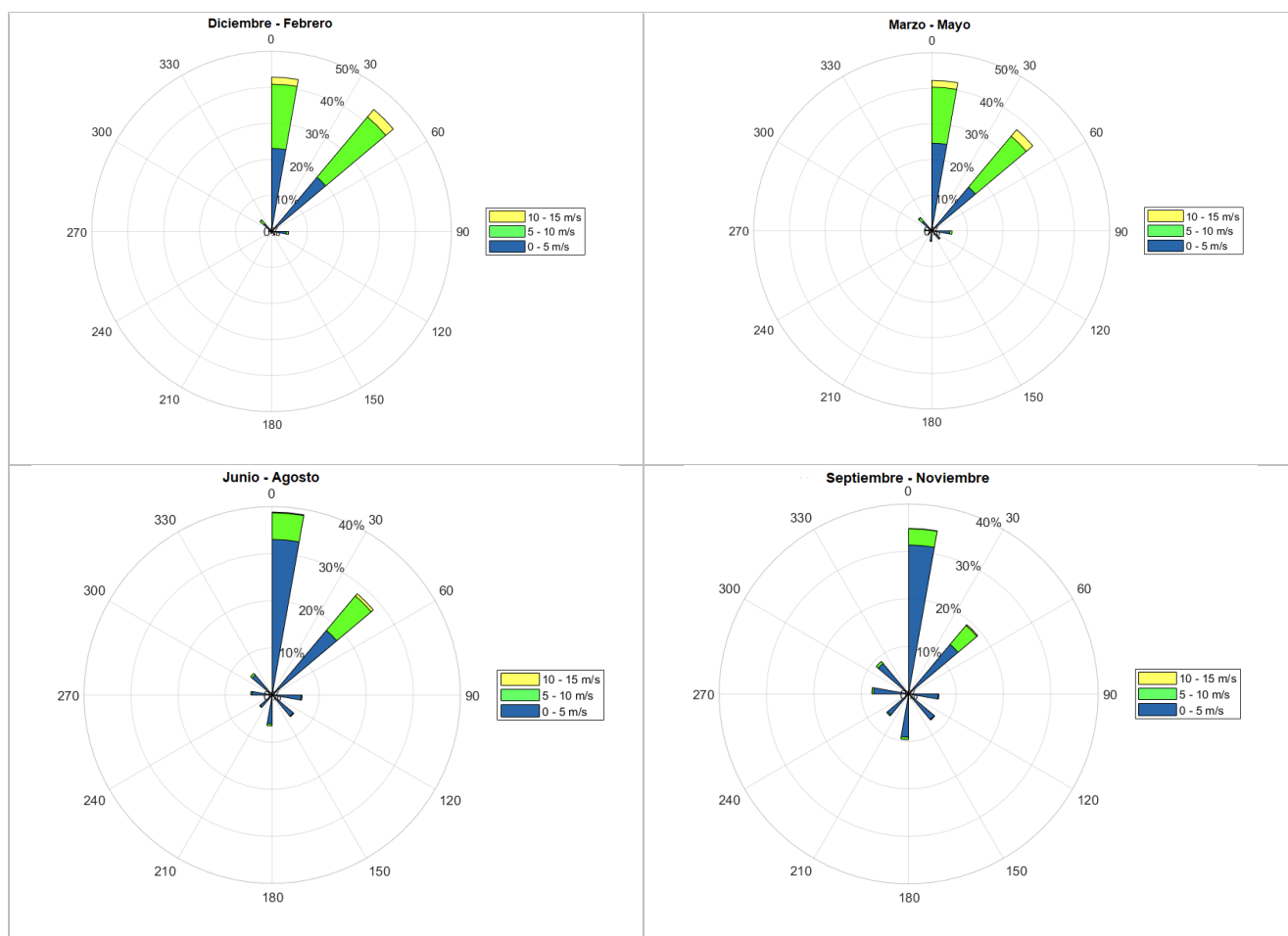


Figura 5-28. Dirección del viento por trimestre según registros estación Ernesto Cortissoz

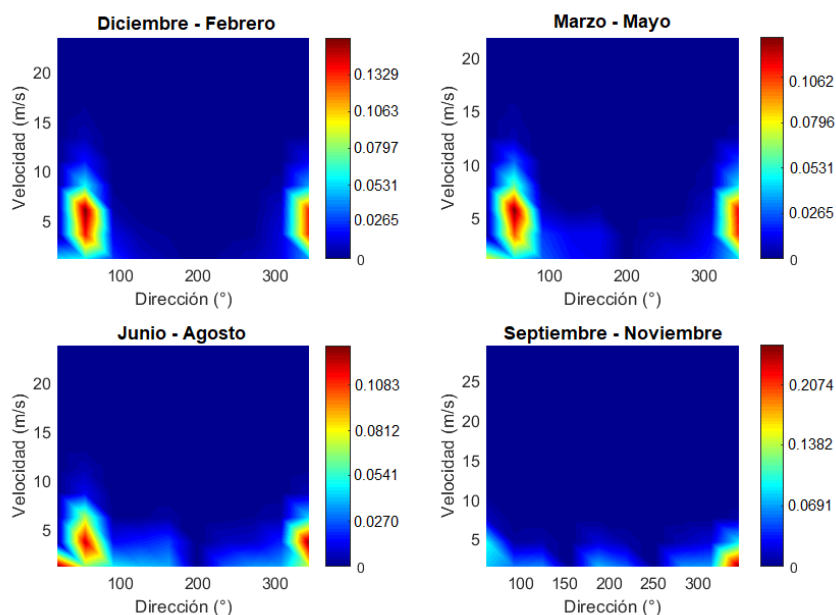
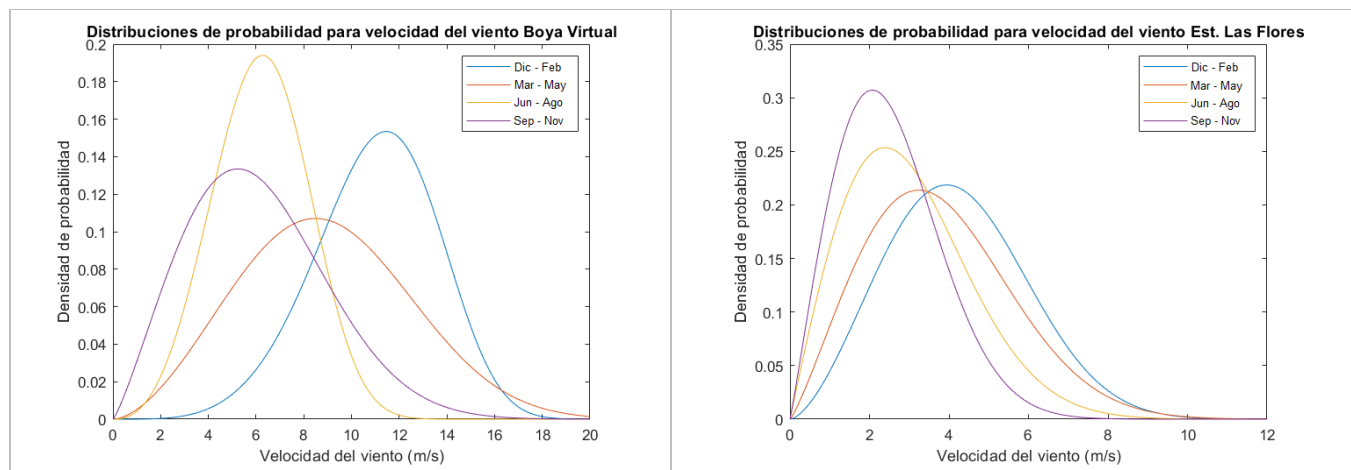


Figura 5-29. Probabilidad conjunta dirección y velocidad del viento Estación Ernesto Cortissoz

A partir de los datos obtenidos se procedió a realizar el ajuste a distribuciones de probabilidad Weibull, Log normal y Gamma principalmente. Este ajuste se realizó a través de la prueba de bondad de ajuste teniendo en cuenta los resultados de valor  $p$ , estadístico de Anderson Darling y ajuste visual de los datos. Las distribuciones de probabilidad y los gráficos de probabilidad acumulada se presentan en la Figura 5-30 y Figura 5-31.



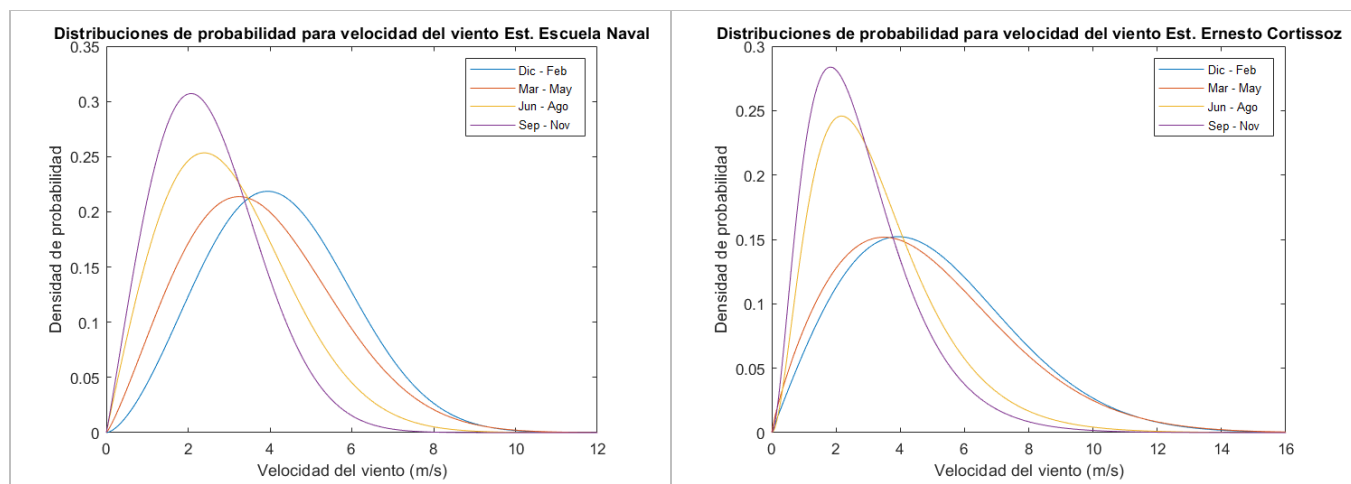


Figura 5-30. Distribuciones de probabilidad de velocidad de viento por trimestre

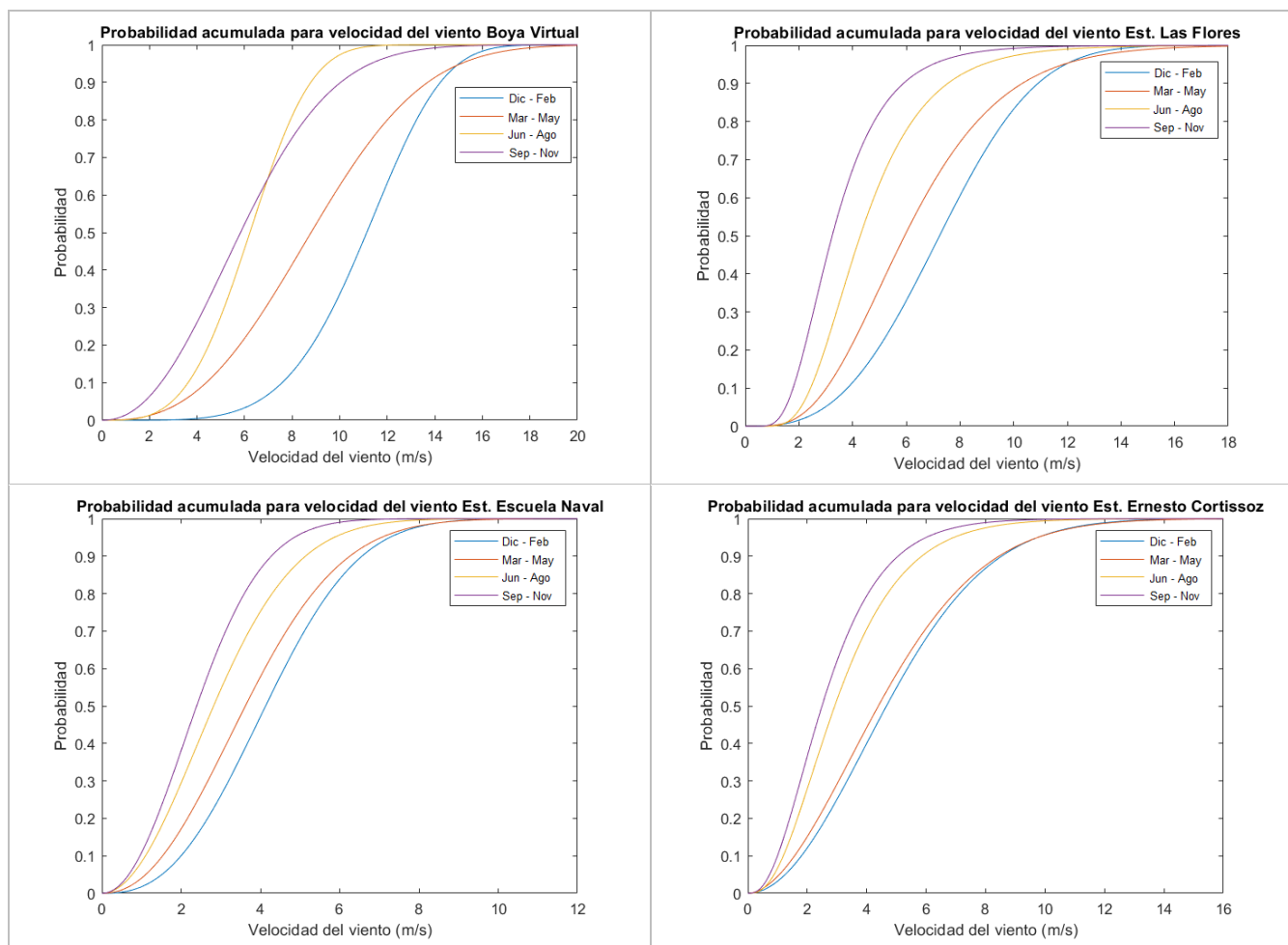


Figura 5-31. Probabilidad acumulada de velocidad del viento por trimestre

Se evidencia que la mayor magnitud del viento se encuentra en la zona costera, por lo que a partir de la extracción de datos máximos anuales se procedió a realizar un análisis de frecuencia de máximos para el cual se ajustó a una distribución de valor extremo más grande (Figura 5-32 y Tabla 5-14). Aproximadamente valores de velocidad superiores a 17.1 m/s (7 en la escala de Beaufort) son excedidos con un periodo de retorno de 2 años, valores de viento superiores atienden a la ocurrencia de eventos de tormenta o fenómenos meteorológicos como el veranillo de San Juan en los cuales se presentan velocidades de viento elevadas.

Tabla 5-14. Resumen de resultados de análisis de frecuencia de velocidad del viento estación Boya Virtual

Porcentaje	Velocidad del viento (m/s)	P	T
1	15.7079	0.99	1.01
5	16.0308	0.95	1.05
10	16.2285	0.9	1.11
20	16.4974	0.8	1.25
50	17.13	0.5	2.00
80	17.9812	0.2	5.00
90	18.5447	0.1	10.00
95	19.0853	0.05	20.00
99	20.3093	0.01	100.00

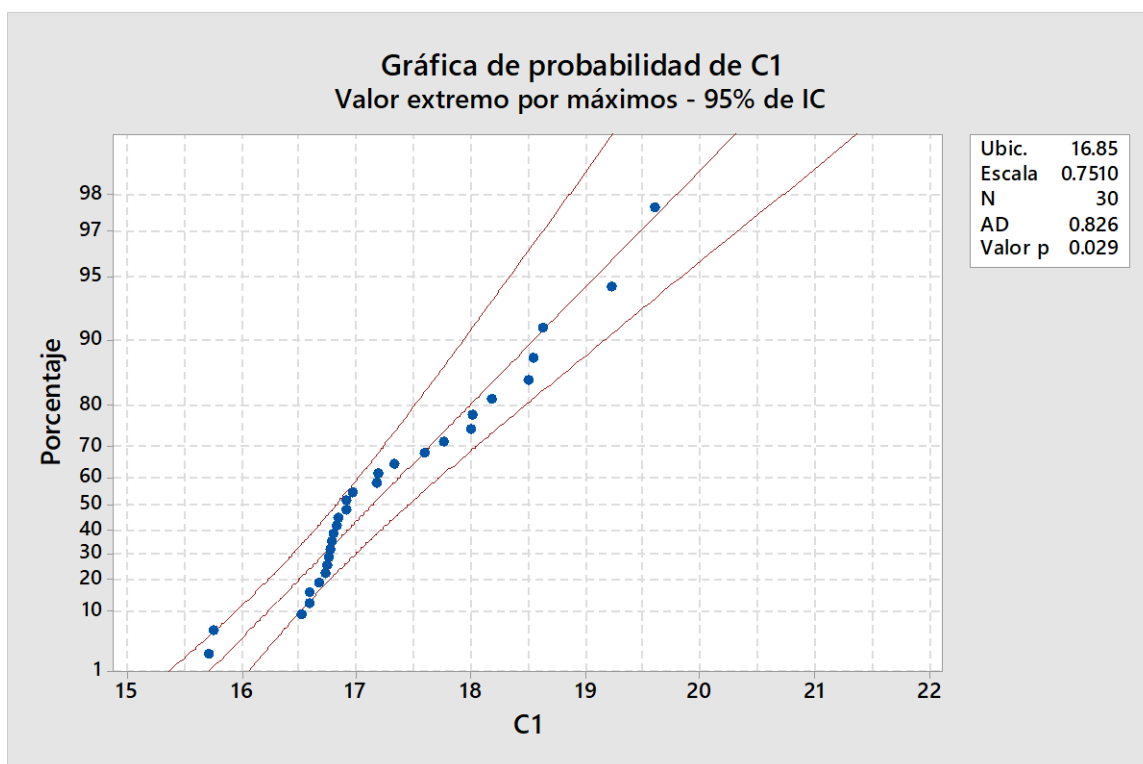


Figura 5-32. Ajuste de valores máximos anuales de velocidad del viento Boya Virtual

#### 5.4.4 Oleaje

Para la caracterización del oleaje se procedió a recopilar información de la altura de ola para la zona costera con la herramienta APPMAR 1.0 la cual descarga de información igual que para la información de viento. Con la información se procede a calcular la altura de ola media y altura de ola significativa por trimestre.

- Altura de ola promedio

$$h_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (22)$$

- Altura de ola significativa

$$h_{\frac{1}{3}} = \frac{1}{n/3} \sum_{i=1}^{n/3} h_i \quad (23)$$

En la Tabla 5-15 se presentan los resultados del cálculo estadístico de altura de ola promedio y altura de ola significativa.

*Tabla 5-15. Resumen de estadísticos de altura de ola promedio y altura de ola significativa*

Trimestre	Altura de ola promedio	Altura de ola significativa
Diciembre-Febrero	2.5273	3.3634
Marzo-Mayo	1.9901	2.9014
Junio-Agosto	2.0803	2.9017
Septiembre-Noviembre	1.3840	2.1073

Posteriormente se procedió a realizar el ajuste a distribuciones de probabilidad Weibull de dos y tres parámetros. Este ajuste se realizó a través de la prueba de bondad de ajuste teniendo en cuenta los resultados de valor  $p$ , estadístico de Anderson Darling y ajuste visual de los datos. Las distribuciones de probabilidad y los gráficos de probabilidad acumulada se presentan en la Figura 5-33 y Figura 5-34.

Tabla 5-16. Resumen de ajuste de distribuciones de probabilidad para datos de oleaje

Trimestre	Distribución	Factores	Valor	Valor p	AD
Diciembre-Febrero	Weibull 3P	Escala	2.32254	>0.5	0.292
		Forma	3.08461		
		Valor umbral	0.42549		
Marzo-Mayo	Weibull 3P	Escala	1.90957	>0.5	0.179
		Forma	2.18853		
		Valor umbral	0.26594		
Junio-Agosto	Weibull	Escala	2.32765	0.05	2.832
		Forma	3.09463		
Septiembre-Noviembre	Weibull 3P	Escala	1.19511	0.147	0.568
		Forma	1.79302		
		Valor umbral	0.29464		

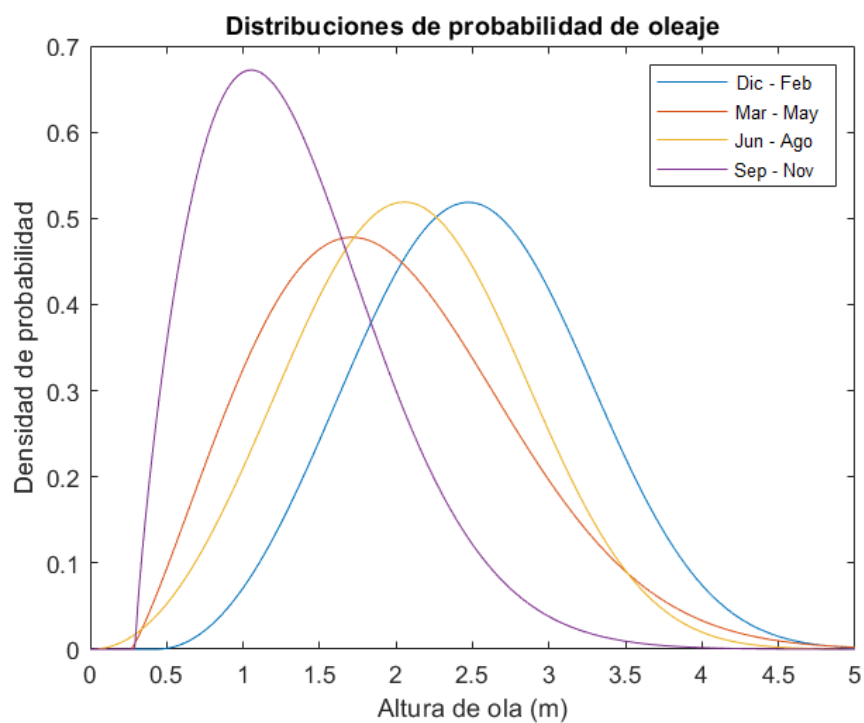
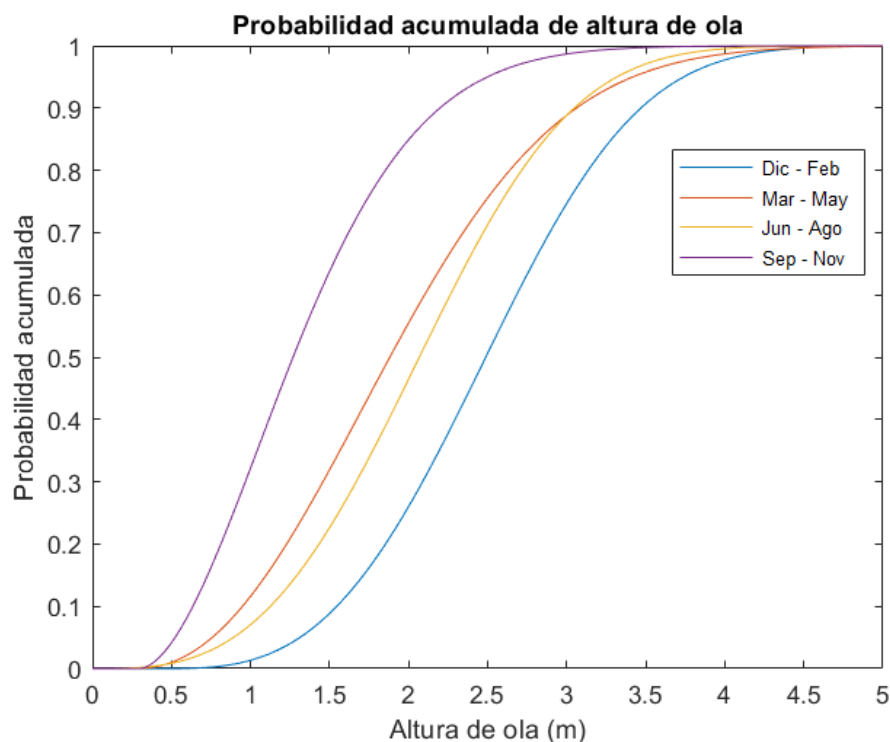


Figura 5-33. Distribuciones de probabilidad ajustadas para datos de altura de ola



*Figura 5-34. Probabilidad acumulada ajustada para datos de altura de ola*

En estudios realizados por el grupo de estudios oceanográficos de la Universidad del Norte (Ospino et al., 2018; Otero, et al., 2016; Urbano et al., 2013) han realizado modelaciones de propagación de oleaje en la zona de la desembocadura con el modelo MOHID y COPLA-SP. Los resultados sugieren que el efecto del oleaje puede percibirse hasta el K5 en eventos de mayor energía (época seca) con altura de ola por encima de la ola significativa de hasta +3 metros. En eventos de menor oleaje (época húmeda) el oleaje tiene altura de 1 metro aproximadamente. En la Figura 5-35 se presentan los resultados de magnitud de oleaje para modelaciones en MOHID de escenarios de máximo y mínimo oleaje registrados en la desembocadura.



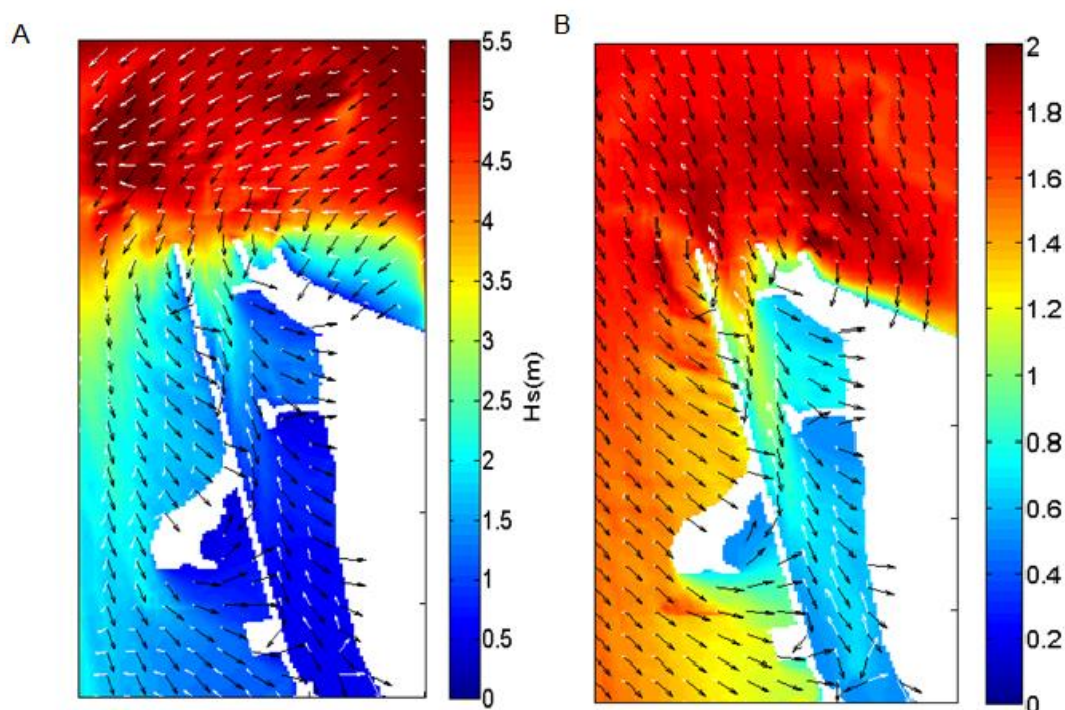


Figura 5-35. Magnitud para altura de ola en eventos A) de máximo oleaje B) mínimo oleaje. (Otero et al., 2016)

En la Figura 5-36 se aprecia que los datos de viento y oleaje registrados en la zona costera presentan los resultados de una regresión para los datos junto con los resultados de valores residuales, se observa una tendencia la cual permite obtener una correlación de altura de ola esperada a partir del viento, esta información es fundamental para la generación de los escenarios aleatorios de riesgo buscando que los resultados sean coherentes. En la parte superior de la Figura 5-36 se presenta la regresión de datos velocidad del viento en m/s (*wind*) y altura de ola en metros (*swell*) con los respectivos intervalos de confianza al 95% en línea punteada azul, en la segunda parte de la figura se presenta en análisis de residuos, en la cual se observa que estos se ajustan a una distribución normal y presenta homocedsaticidad. Con  $x$  se marcan los datos atípicos.

La regresión tiene un  $R^2$  de 0.7736 y una ecuación cuadrática de ajuste viento (W) – oleaje (S) presentada en la Ecuación (24):

$$S = 0.007088W^2 + 0.0658W + 0.6339 \quad (24)$$

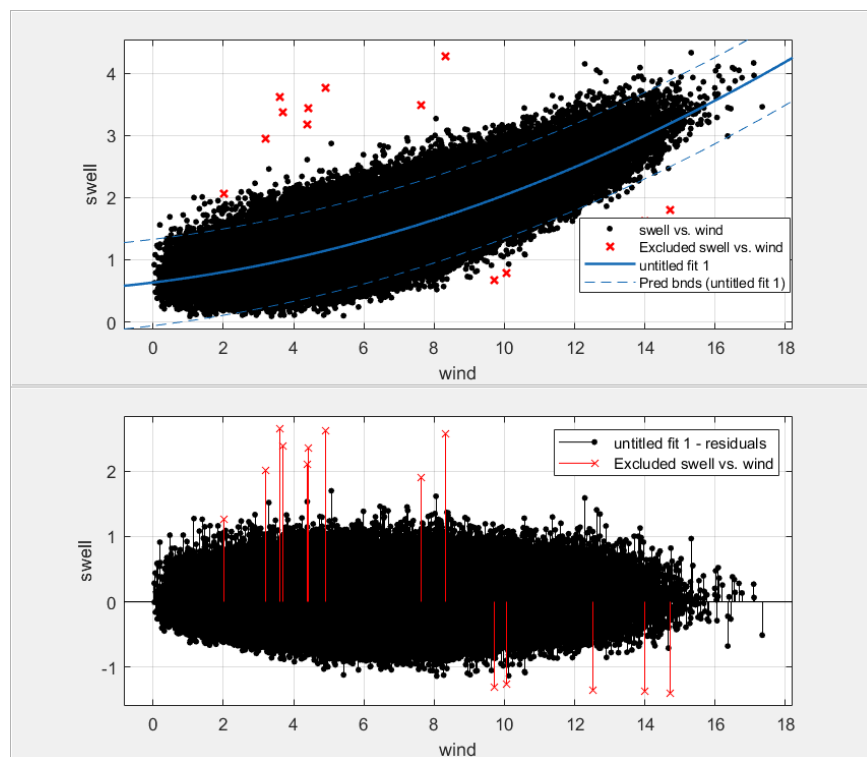
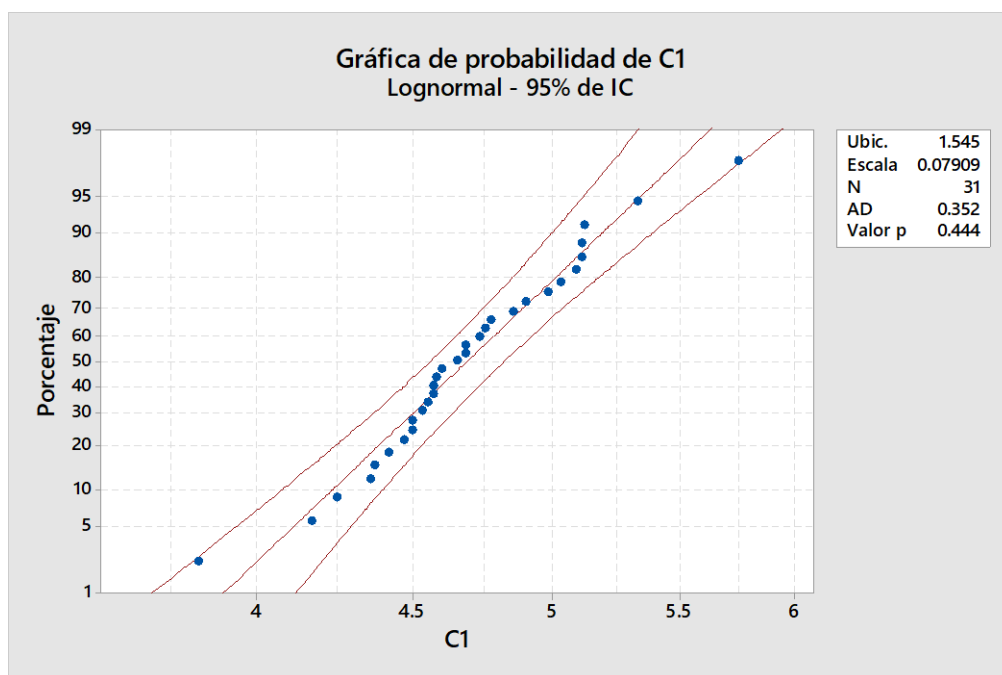


Figura 5-36. Regresión datos velocidad del viento y altura de ola sector costero

En la Tabla 5-17 y Figura 5-37 se presenta el ajuste y análisis de frecuencia de los datos de altura de ola máxima anual a partir de los 31 años de información.

Tabla 5-17. Resumen de resultados de análisis de frecuencia de altura de ola estación Boya Virtual

Porcentaje	Altura de ola (m)	P	T
1	3.91242	0.99	1.01
5	4.12546	0.95	1.05
10	4.24373	0.9	1.11
20	4.3915	0.8	1.25
50	4.68869	0.5	2.00
80	5.00598	0.2	5.00
90	5.18029	0.1	10.00
95	5.3288	0.05	20.00
99	5.61897	0.01	100.00



*Figura 5-37. Ajuste de valores máximos anuales de altura de ola*

#### 5.4.5 Marea

La amplitud de marea es un parámetro fundamental dentro de la navegación. La carrera de marea local determina los mejores momentos para el arribo de las embarcaciones, afecta la profundidad del canal navegable y puede generar fenómenos puntuales de corrientes longitudinales que pueden afectar la maniobrabilidad de la embarcación. Para el sector de Bocas de Ceniza a partir de los armónicos de marea y de registros históricos de la DIMAR y Cormagdalena se generó una serie sintética de marea para evaluar el rango típico de valores (Figura 5-38), adicionalmente en la Figura 5-39 se presenta la curva de remanso para el sector de estudio en condiciones extrema de altos y bajos caudales presentados en 2010 (Findeter & Cormagdalena, 2020).

La marea en el sector tiene un número de forma  $F$  de 1.8633 lo cual la cataloga como marea mixta principalmente diurna. Los valores típicos varían entre 0.2681 y -0.2294 metros dependiendo de las condiciones meteorológicas y astronómicas generando una carrera de marea aproximada de 0.4975 metros. El CIOH y las tablas del IDEAM de pleamares y bajamares (IDEAM, 2020) registra dentro de sus pronósticos valores de hasta 0.5 metros de altura en condiciones de pleamar de sicigia.

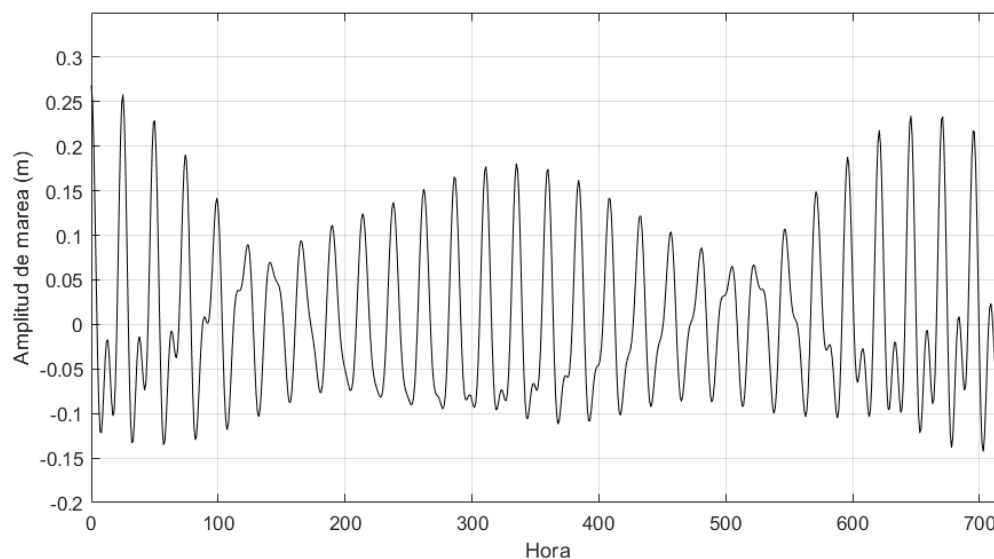


Figura 5-38. Amplitud de marea para el sector de Bocas de Ceniza

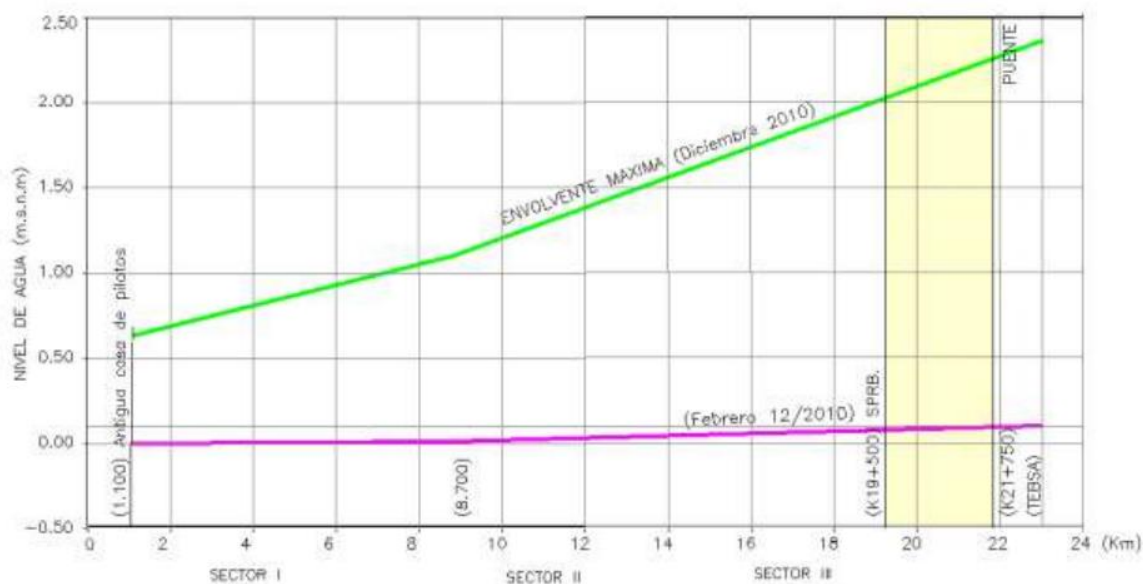


Figura 5-39. Curva de remanso en la zona de estudio. (Findeter & Cormagdalena, 2020)

Con el fin de simplificar el modelo de riesgo la condición de marea se limitó a ser analizada como condición de frontera para el modelo hidrodinámico con un valor de 0 metros sobre el nivel siendo la condición promedio dentro del registro de marea analizado anteriormente. De igual forma, dentro de las condiciones de operatividad del puesto se quiere de la instalación de un mareógrafo en la zona de la desembocadura el cual permitiría una mejor planificación de la operatividad diaria del puerto y brindaría datos para un modelo de riesgo a corto plazo

## 5.5 Modelación hidrodinámica 2D

### 5.5.1 Definición del sector de estudio para modelación

La modelación requiere de definir un dominio espacial en el cual tanto la frontera arriba como aguas abajo sean sectores relativamente geomorfológicamente estables y que no presenten bifurcaciones, por esta razón se extiende el sector de estudio para modelación desde K0 hasta el K26 justo antes de la curva de la isla Cabica para evitar que la frontera aguas arriba sea la isla Rondón y que la estación TEBSA ubicada en el K23 sirva para la calibración del modelo. A pesar de que el sector ha presentado variaciones espaciales, en los últimos años no se han evidenciado cambios significativos (Gomez et al., 2019).

### 5.5.2 Recopilación de información base y montaje del modelo

En el software iRIC se procedió a realizar el montaje dentro del modelo hidromorfológico Mflow\_02 con coordenadas proyectadas MAGNA SIRGAS Colombia Bogotá EPSG 3116; para la definición del dominio del mallado se utilizó una imagen satelital LANDSAT de diciembre de 2018 y para la elevación del terreno se usó una batimetría suministrada por DIMAR y procesada por el Observatorio del Río Magdalena para el sector de estudio levantada durante el mes de diciembre de 2018. Como condiciones de borde se presenta aguas arriba una condición de variación de caudal dada por el usuario, y la condición aguas abajo en una condición de nivel en la cual el nivel de la lámina de agua varía en función del registro de marea ingresado por el usuario. Los datos para las condiciones de frontera ya fueron procesados tal como se presenta en los capítulos anteriores.

De igual manera el modelo Mflow\_02 por tener una malla no estructurada permite adaptarse a geometrías complejas como estructuras hidráulicas, además permite la refinación de la malla en estas zonas para dar detalle al comportamiento del flujo a su paso por esta zona. Se procedió a definir polígonos de refinamiento en los diques de contracción cercanos a la desembocadura, los espolones adosados 1 y 2, y en la zona alrededor de las pilas de los puentes ubicados en el K22 debido a la interacción de estas estructuras sobre el flujo. Los triángulos de la malla tienen un área máxima 4000 m<sup>2</sup> y en las zonas de refinamiento el área máxima de los triángulos es de 1500 m<sup>2</sup>.

En la Figura 5-40 se presenta el mallado del modelo y en la Figura 5-41 se presenta la batimetría ingresada al modelo y el detalle de la zona de refinamiento.

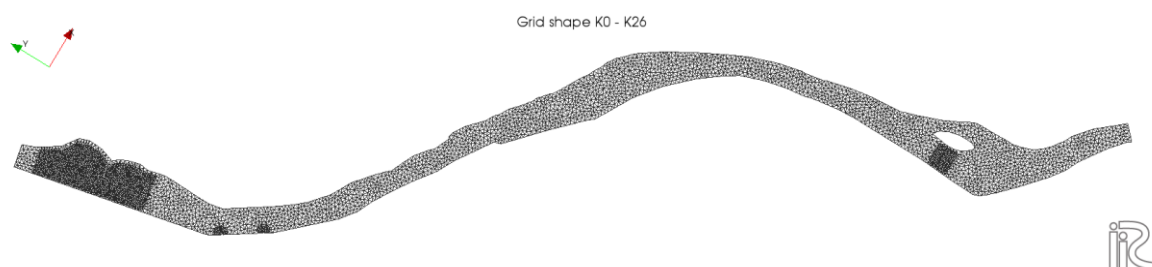


Figura 5-40. Malla no estructurada usada en el modelo

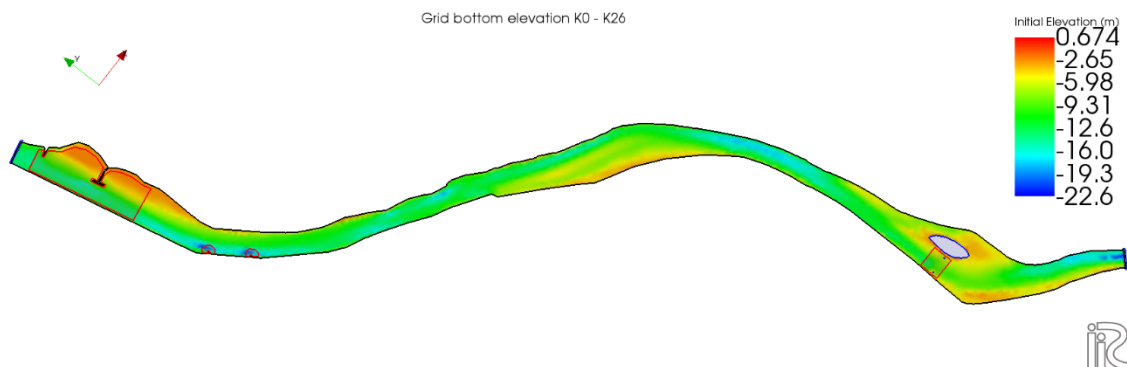


Figura 5-41. Batimetría ingresada en el modelo

La modelación se realizó para un día periodo en el cual se evidencia la estabilización del modelo computacional en escenario de flujo permanente, se modelaron el rango de caudales entre 2000 m<sup>3</sup>/s hasta 12000 m<sup>3</sup>/s según el rango establecido como probable para el río en el sector y según los cálculos realizados por el Observatorio del Río Magdalena.

### 5.5.3 Calibración del modelo

El proceso de calibración del modelo del ajuste del coeficiente de rugosidad de Manning, ya que la altura de la lámina de agua depende de la rugosidad del lecho. Por lo tanto se procedió a partir de valores esperados de Manning según modelos realizados anteriormente por el Observatorio del Río Magdalena y literatura sobre coeficientes de Manning usados a nivel mundial (Arcement & Schneider, 1989; Limerinos, 1970). En la Tabla 5-18 se presentan los datos de calibración del modelo para cada uno de los caudales.

Tabla 5-18. Resultados de calibración a partir del coeficiente de Manning

Resultados modelación			
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Nivel (m)	Manning	Error
2000	0.085	0.024	4%
3000	0.17	0.024	-2%
4000	0.315	0.025	0%
5000	0.475	0.0255	-2%
6000	0.69	0.0255	-1%
7000	0.955	0.026	0%
8000	1.23	0.027	-1%
9000	1.575	0.028	0%
10000	1.97	0.0295	0%
11000	2.36	0.03	0%
12000	2.85	0.031	0%

Dentro de las limitaciones y alcances de la presente tesis el modelo usado está validado para diferentes ríos y estuarios a nivel mundial, mas no está pensado para modelar procesos costeros de propagación

de oleaje y corrientes marinas. Estos modelos requieren de mucha más información en campo con la cual no se cuenta al momento de realizar la presente tesis. La integración completa del modelo de riesgo junto con modelos numéricos para procesos costeros de plantea como trabajo futuro.

#### 5.5.4 Resultados modelo hidrodinámico

La principal salida del modelo hidrodinámico es la distribución espacial de la velocidad del flujo tanto en magnitud como en dirección. Los resultados muestran que la velocidad en el canal navegable varía entre 0.32 m/s y 0.44 m/s en caudales bajos de 2000 m<sup>3</sup>/s, en condiciones promedio de caudal (7000 m<sup>3</sup>/s) la velocidad varía entre 1.05 m/s y 1.48 m/s, para caudales altos de 12000 m<sup>3</sup>/s la velocidad varía entre 1.53 m/s y 2.39 m/s. En la Tabla 5-19 se presenta el resumen estadístico de los resultados de velocidad modelada del río en la sección del canal navegable.

*Tabla 5-19. Resultados de velocidad del flujo en el canal navegable*

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Mínimo	Promedio	Máximo	Desviación
2000	0.3194	0.3691	0.4464	0.0263
3000	0.4784	0.5503	0.6586	0.0373
4000	0.6352	0.7279	0.8593	0.0470
5000	0.7866	0.8998	1.0459	0.0551
6000	0.9278	1.0688	1.2649	0.0664
7000	1.0504	1.2298	1.4856	0.0769
8000	1.1580	1.3831	1.6502	0.0893
9000	1.2739	1.5242	1.8152	0.0974
10000	1.3903	1.6635	2.0147	0.1192
11000	1.4623	1.7990	2.2129	0.1409
12000	1.5347	1.9131	2.3918	0.1687

En términos espaciales se muestra que los sectores de mayor velocidad son cerca de las estructuras de contracción del flujo entre el K0 y K2+500; así mismo, los espolones adosados los cuales tiene la intención de profundizar el cauce también por efectos locales aumentan la velocidad. Los mínimos de velocidad se presentan a la altura del K14 en la cual la sección transversal del río se amplía. En la Figura 5-42 se presentan los resultados espaciales de velocidad para los caudales mínimos, promedio y máximo simulado, y en la Figura 5-43 se presentan los resultados de velocidad extraída del raster de velocidades teniendo en cuenta el área del canal navegable.



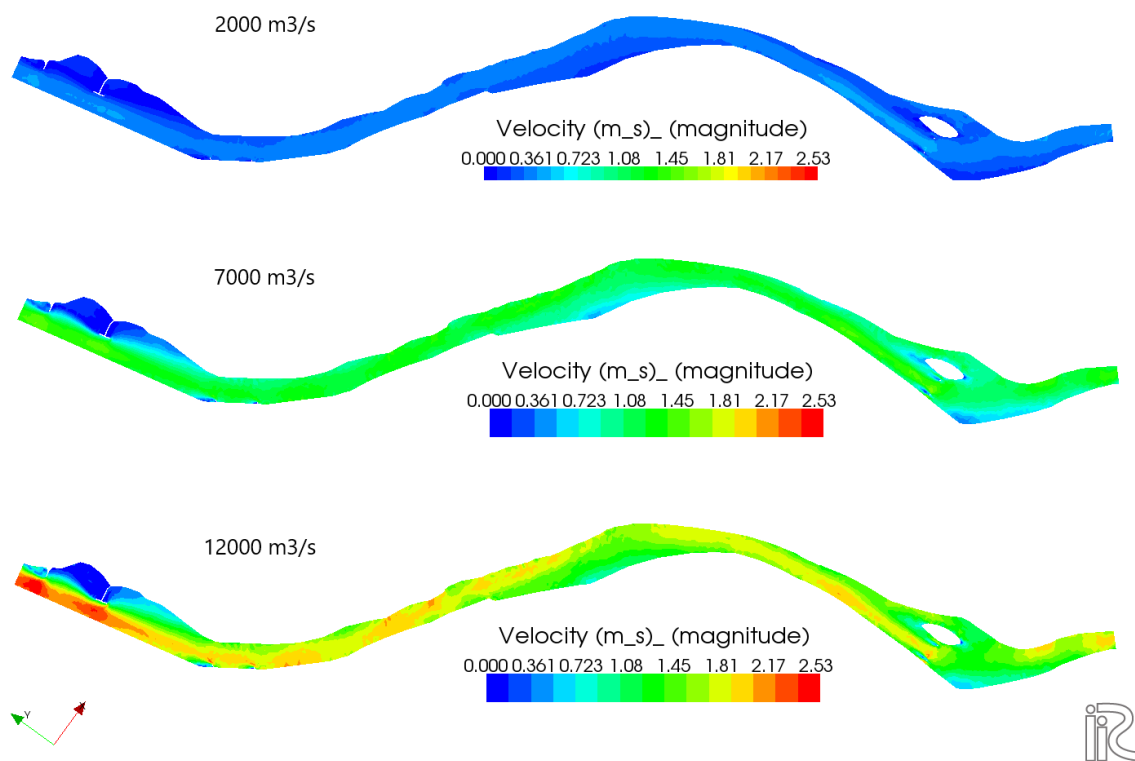


Figura 5-42. Resultados de velocidad para caudales de 2000 m<sup>3</sup>/s, 7000 m<sup>3</sup>/s y 12000 m<sup>3</sup>/s

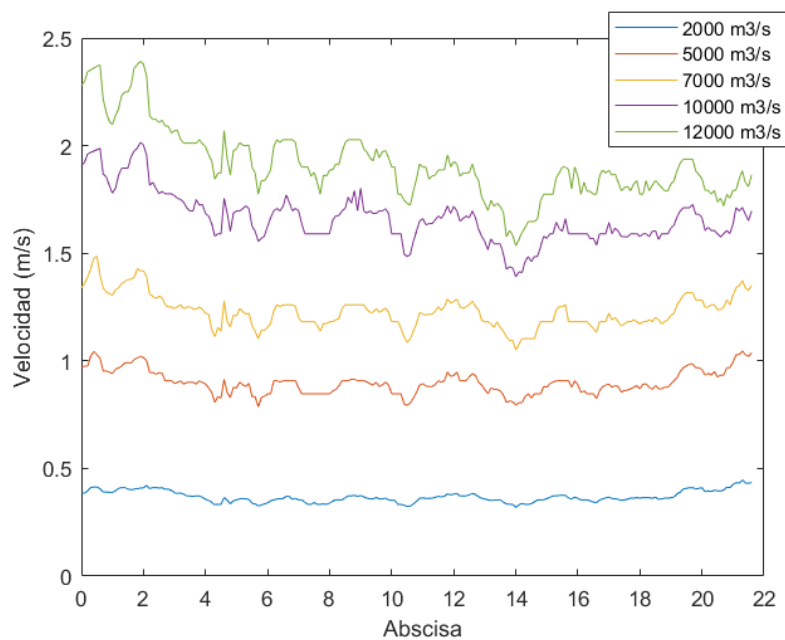


Figura 5-43. Perfil longitudinal de velocidad media en el canal navegable para rango de caudales

## 6 MODELO DE RIESGO A LA NAVEGACIÓN

El análisis de riesgo hidrometeorológico asociado a la navegación de las embarcaciones próximas a salir o arribar a las concesiones portuarias ubicadas en el tramo del río analizado se calculó con base a las variables hidrometeorológicas ya definidas anteriormente. Estas variables son las de mayor incidencia determinadas por parte de los reportes hidrometeorológicos realizados por parte de DIMAR y discutidas dentro de las mesas de trabajo realizadas con expertos dentro del convenio entre la Universidad del Norte y Cormagdalena

A partir del análisis estadístico de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada de las variables identificadas se procede a generar las curvas asociadas a la probabilidad de ocurrencia teniendo en cuenta el tipo de variable y su impacto a medida que varían las funciones acumuladas. El análisis de riesgo tiene como fin mejorar las actividades portuarias en el río y proponer con anterioridad soluciones ante las eventuales condiciones que se presentaran en el río que pueden interferir en la navegación.

### 6.1 Generación de curvas de vulnerabilidad y probabilidad

A partir de información recolectada sobre las restricciones portuarias generadas por DIMAR junto con las prestaciones de las embarcaciones de diseño se procedió a generar las curvas de vulnerabilidad y de probabilidad para las variables de análisis influyen en el movimiento de las embarcaciones (viento, nivel, oleaje y velocidad).

#### 6.1.1 Viento

Los criterios de probabilidad de ocurrencia para el viento se definen a partir de la probabilidad acumulada de los registro de velocidad del viento en m/s, para valores inferiores a 0.5 la probabilidad (likelihood)  $f(x)$  tiene un valor de 5, a medida que la probabilidad acumulada aumenta, la función  $f(x)$  decrece en función a los criterios establecidos en la Tabla 4-1, la curva generada se ajusta con el mejor  $R^2$  y se presenta en la Figura 6-1.

$$f(x) = \begin{cases} 5, & x \leq 0.5 \\ -25x^2 + 27.5x - 2.5, & 0.5 > x \leq 1 \end{cases} \quad (25)$$

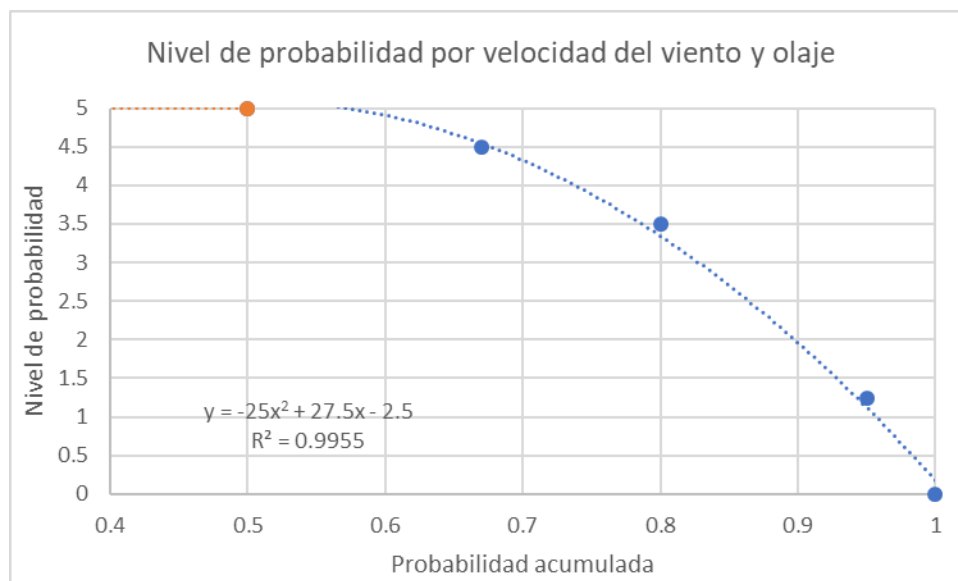


Figura 6-1. Curva de probabilidad registros de viento

Las embarcaciones tipo SUPRAMAX son las embarcaciones que presentan mayores restricciones en la aproximación al puerto principalmente por la condición de deriva que se registra para vientos superiores a 15 m/s, esto se debe principalmente a que los portacontenedores y graneleros SUPRAMAX presenta una mayor área efectiva de arrastre sobre la cual el viento ejerce una condición de deriva. La curva construida en la Figura 6-2 representa la respuesta de la embarcación frente al forzamiento por viento, para valores de viento superiores a 17.1 m/s, cuando la magnitud del viento supera los 17.1 m/s (7 en la escala de Beaufort), la vulnerabilidad es igual a 5 debido a los riesgos que presenta la proximidad de estructuras hidráulicas al canal navegable la navegación. Es posible que las ráfagas de viento desplacen la embarcación hacia las estructuras o fuera del canal generando una colisión o un encallamiento.

$$g(x) = \begin{cases} 0.0016x^3 - 0.00369x^2 + 0.4428x + 0.0325, & x \leq 17.1 \\ 5, & x > 17.1 \end{cases} \quad (26)$$

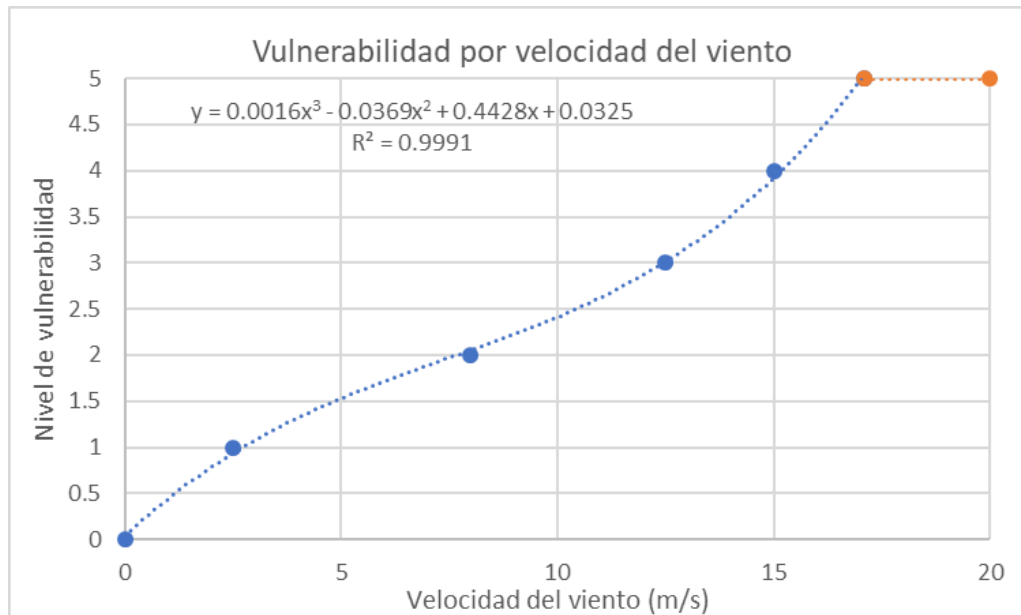


Figura 6-2. Curva de vulnerabilidad en función de la velocidad del viento

### 6.1.2 Oleaje

Los criterios de probabilidad de ocurrencia para el viento se definen a partir de la probabilidad acumulada, para valores inferiores a 0.5 la probabilidad (likelihood)  $f(x)$  tiene un valor de 5, a medida que la probabilidad acumulada aumenta, la función  $f(x)$  decrece en función a los criterios establecidos en la Tabla 4-1 y teniendo en cuenta los criterios de altura de ola promedio ( $p(0.5)$ ) y significativo ( $p(0.67)$ ), la curva generada se ajusta con el mejor  $R^2$  y se presenta en la Ecuación (25) Figura 6-1.

Las embarcaciones tipo SUPRAMAX presentan restricciones en la desembocadura principalmente por la altura de ola y los procesos de difracción y refracción del oleaje entre el K0 y el K2 por los tajamares oriental, occidental y el dique de contracción, estos procesos costeros requieren de un mayor análisis para la caracterización local de este fenómeno. El oleaje constante representa un problema de seguridad en la maniobrabilidad de la embarcación acentuando los movimientos verticales de cabeceo y arfada y horizontales de balanceo. La curva construida en la Figura 6-3 representa la respuesta de la embarcación frente al forzamiento del oleaje, cuando la altura de ola supera los 3 metros históricamente se restringe las actividades de navegación en la desembocadura al comprometerse la seguridad la embarcación por la probabilidad de un contacto con el fondo o la pérdida de gobernabilidad. Para oleajes superiores a 3.5 metros se compromete el ingreso de las embarcaciones y se sugiere que estas permanezcan en la zona de fondeo mientras mejoran las condiciones meteomarinas.

$$g(x) = \begin{cases} 0.1998x^3 - 0.8x^2 + 2.1533x + 0.0345, & x \leq 3.5 \\ 5, & x > 3.5 \end{cases} \quad (27)$$

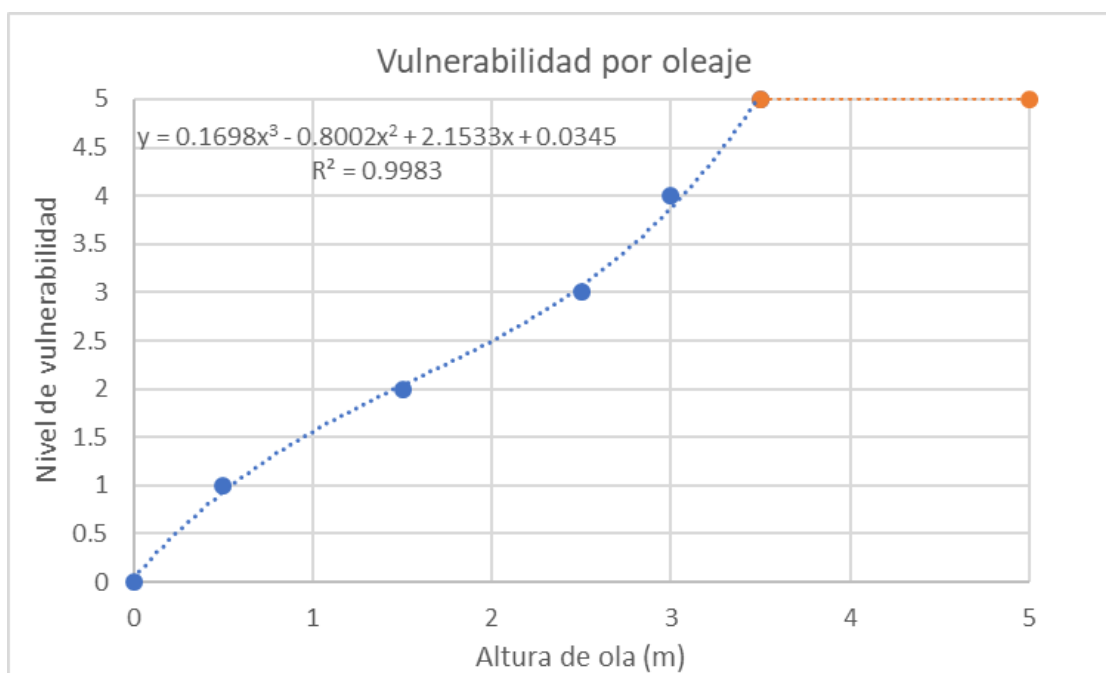


Figura 6-3. Curva de vulnerabilidad en función de altura de ola

### 6.1.3 Profundidad operativa

La profundidad operativa para el puerto de Barranquilla se varia en todo el sector en función de las condiciones batimétricas del canal navegable las cuales se monitorean actualmente con frecuencia semanal. La profundidad operativa define el calado operativo de las embarcaciones que pueden ingresar teniendo en cuenta las restricciones de la DIMAR según el nivel del río y los factores de seguridad Calado/Profundidad, el cual varía según sector del canal navegable y la época del año. En la Tabla 6-1 se resumen los factores de seguridad aplicables al canal navegable.

Tabla 6-1. Factores de seguridad Calado/Profundidad para el canal navegable

Sector del canal navegable	Factor de seguridad	
	Época seca	Época húmeda
K0+000 – K2+000	17%	15%
K2+000 – K21+825	10%	12%

La función  $f(x)$  para la probabilidad se define según los criterios de probabilidad acumulada la cual varia mensualmente, según las distribuciones de nivel del río ajustadas. La función se ajusta a la Ecuación (28)

$$f(x) = -20x^2 + 20x \quad (28)$$

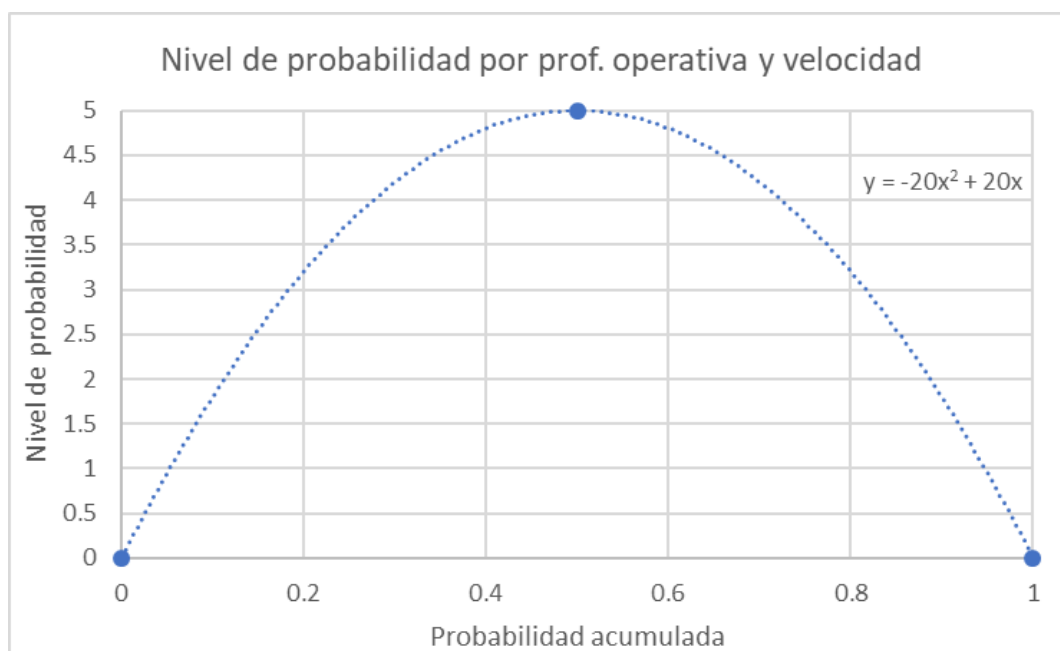


Figura 6-4. Curva de nivel de probabilidad para profundidad operativa y velocidad

La curva de vulnerabilidad por profundidad operativa es construida teniendo en cuenta el calado típico con el que pueden partir o arribar una embarcación, por lo que estas curvas son ajustables en función al calado máximo de la embarcación, sus características de toneladas por centímetro de inmersión y las restricciones de la autoridad marítima. Los datos suministrados por los expertos permitieron definir la curva de vulnerabilidad para embarcaciones de tipo SUPRAMAX con calado máximo típico en agua salada de 11.6 metros; en agua dulce se aplica una corrección del 2.5% debido al cambio de salinidad entre agua dulce y agua salada por lo cual el calado máximo en el sector de estudio se toma de 11.9 metros. La curva  $g(x)$  para vulnerabilidad representa el calado de la embarcación respecto a los 10 metros de calado operativo que se manejan actualmente dentro del puerto según los resultados presentados en la Tabla 5-5 y Tabla 5-6. El calado operativo está en función de la profundidad operativa del río como variable aleatoria caracterizada dentro del análisis de geometría hidráulica mensual. A menor calado operativo implica un mayor riesgo de contacto o encallamiento y una menor cantidad de toneladas movilizadas, esto conlleva a que se tomen decisiones de desvío de la embarcación arribando o esperar la generación de costos por los retrasos en el despacho de estas. En la Figura 6-5 presenta la curva de severidad generada para la embarcación de análisis

$$g(x) = \begin{cases} -0.1876x^3 + 0.5232x^2 - 0.8921x + 1.7071, & x \geq -1.5 \\ 5, & x < -1.5 \end{cases} \quad (29)$$

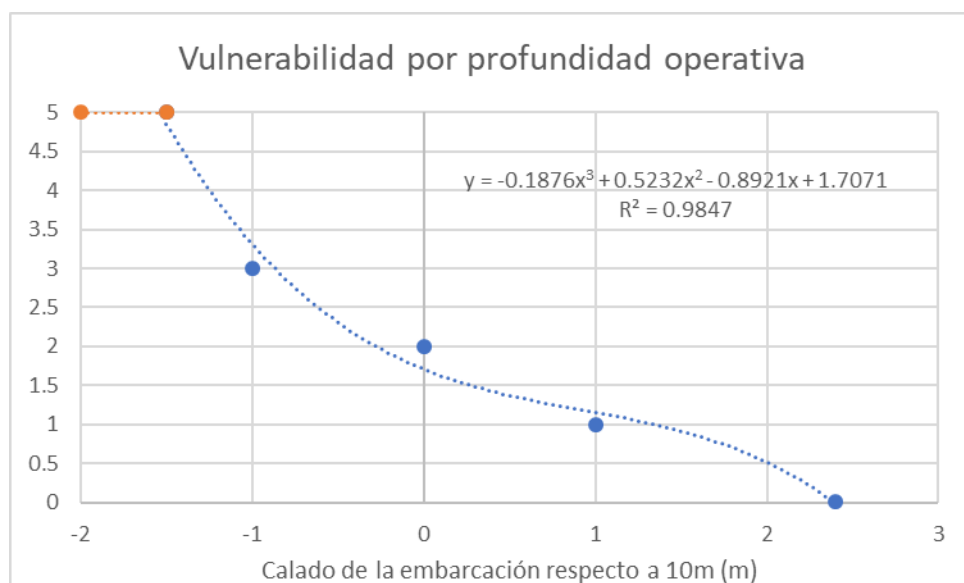


Figura 6-5. Curva de vulnerabilidad por profundidad operativa

#### 6.1.4 Velocidad

La velocidad de la embarcación respecto al flujo representa una variable de análisis para evaluar la capacidad de maniobrabilidad del buque. La velocidad del flujo varía espacialmente según las características hidrodinámicas del cauce y del caudal presente. La función  $f(x)$  de probabilidad se ajusta a las distribuciones de probabilidad de nivel del río y se construye teniendo en cuenta los valores promedio como los de máxima probabilidad de ocurrencia y los escenarios de mínimos y máximos como los de menos ponderación dentro de la curva construida en la Ecuación (28) y Figura 6-4.

La vulnerabilidad respecto a la velocidad se mide con el número de Froude  $F_{nh}$ , este término aplicado al sector de estudio a partir de los resultados del modelo hidrodinámico permite identificar los sectores en los cuales se vería comprometida la navegación respecto a la maniobrabilidad. Dentro de los comentarios presentados por los navegantes estos expresan que en época húmeda, en la cual los caudales del río son mayores, se restringe la navegación ya que las embarcaciones tienden a perder maniobrabilidad debido a corriente a favor. La función de severidad empírica  $g(x)$  está ajustada a partir del número de Froude, teniendo como referencia la velocidad máxima a la cual puede desplazarse la embarcación de análisis dentro de sus prestaciones y la velocidad del río como la variable aleatoria.

$$g(x) = \begin{cases} -41.667x^3 + 58.333x^2 - 15.06x + 1.0357, & x \leq 0.8 \\ 5, & x > 0.8 \end{cases} \quad (30)$$



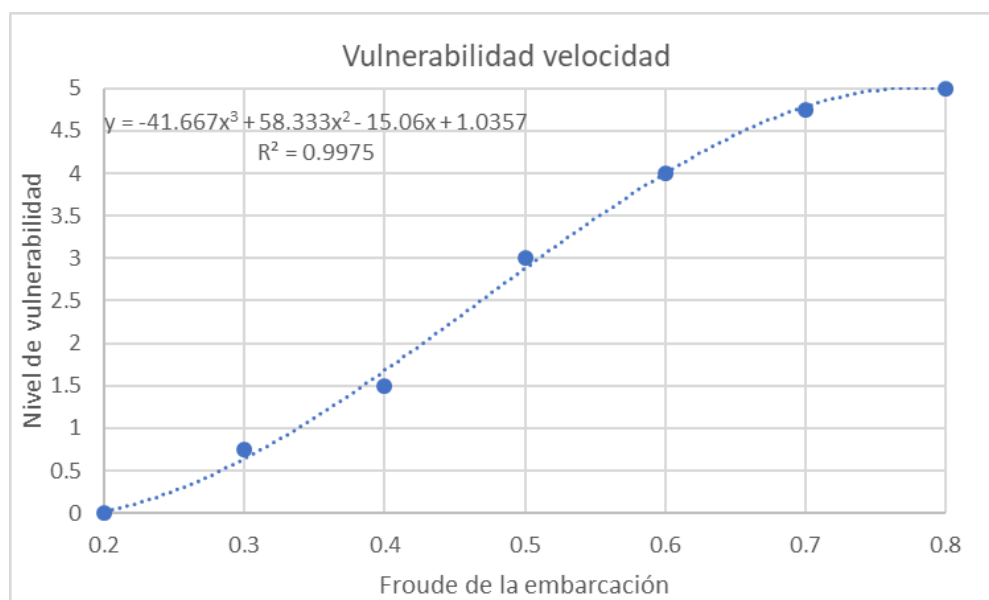


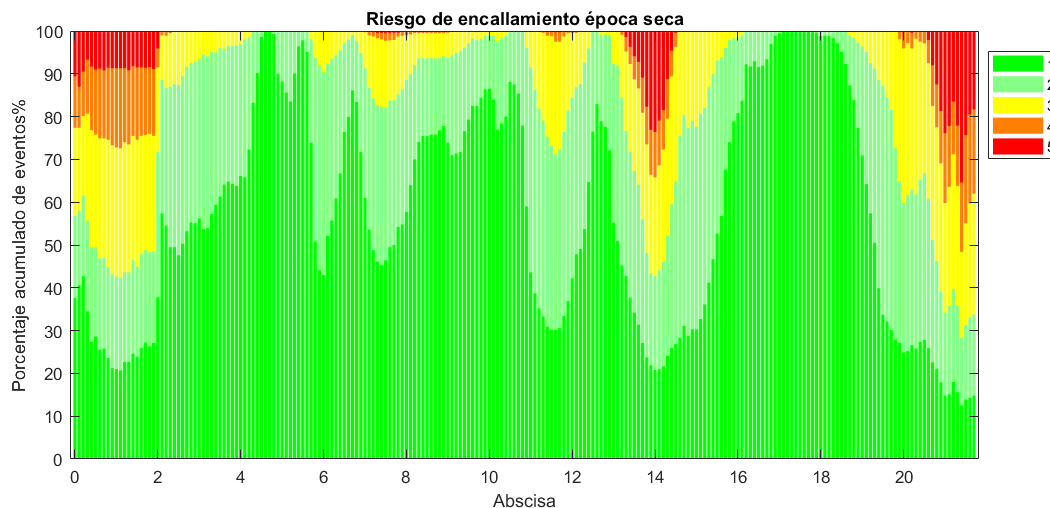
Figura 6-6. Curva de vulnerabilidad en función del número de Froude de la embarcación

## 6.2 Escenarios y evaluación de riesgo

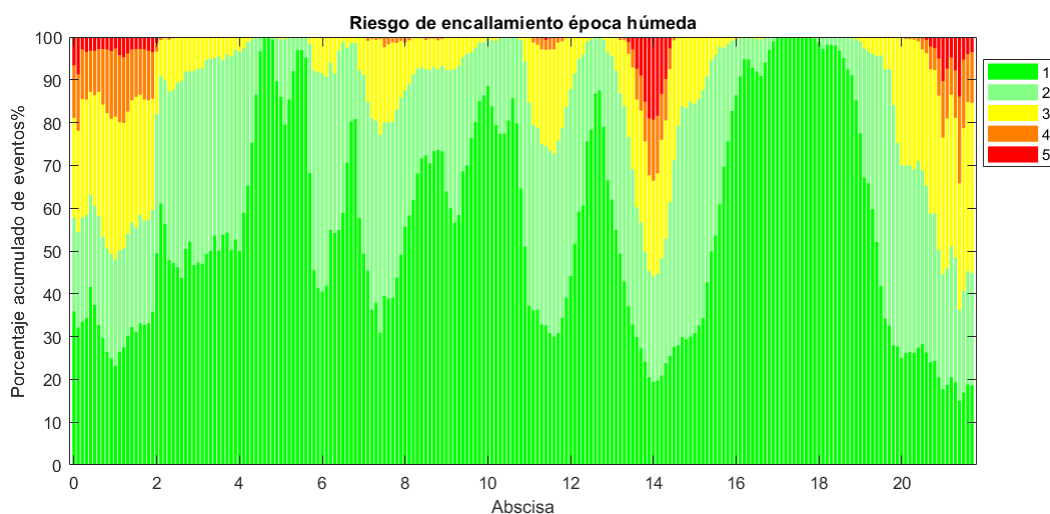
Para la evaluación de los escenarios de riesgo se estructuró un modelo de simulación de Montecarlo en el cual se generaron 1000 escenarios aleatorios por mes a partir de las distribuciones de probabilidad de las variables de análisis. Los 12000 resultados permiten caracterizar el comportamiento y tendencias del viento, niveles, oleaje, caudal y velocidad a lo largo del año en función de la vulnerabilidad y probabilidad de ocurrencia según los resultados aleatorios para representar los escenarios de riesgo  $R_i$ . A continuación, se presentan los resultados del modelo según la metodología ampliada en el Capítulo 5.

### 6.2.1 Riesgo de encallamiento

Dentro de las condiciones de navegabilidad se observa que la variable más restrictiva es el calado de ingreso de la embarcación, las condiciones morfológicas sumado al alto transporte de sedimento hacen que la profundidad del canal navegable fluctúe considerablemente a lo largo del año y sea la principal causa de desvío de embarcaciones que arriban al puerto debido al riesgo inminente de un accidente como un encallamiento debido al poco margen de seguridad bajo la quilla (*UKC en inglés*) de la embarcación. El análisis de riesgo espacial presentado en la Figura 6-7 y Figura 6-8 muestra diferencias importantes entre navegar en época seca y época húmeda, la diferencia más significativa se presenta entre los meses de febrero y noviembre en los cuales se presentan históricamente caudales mínimos y máximos anuales respectivamente. Los resultados están organizados en función del porcentaje acumulado de valores de riesgo obtenidos por abscisa en el sector de estudio.



*Figura 6-7. Resultados del modelo de riesgo por encallamiento en época seca (febrero)*



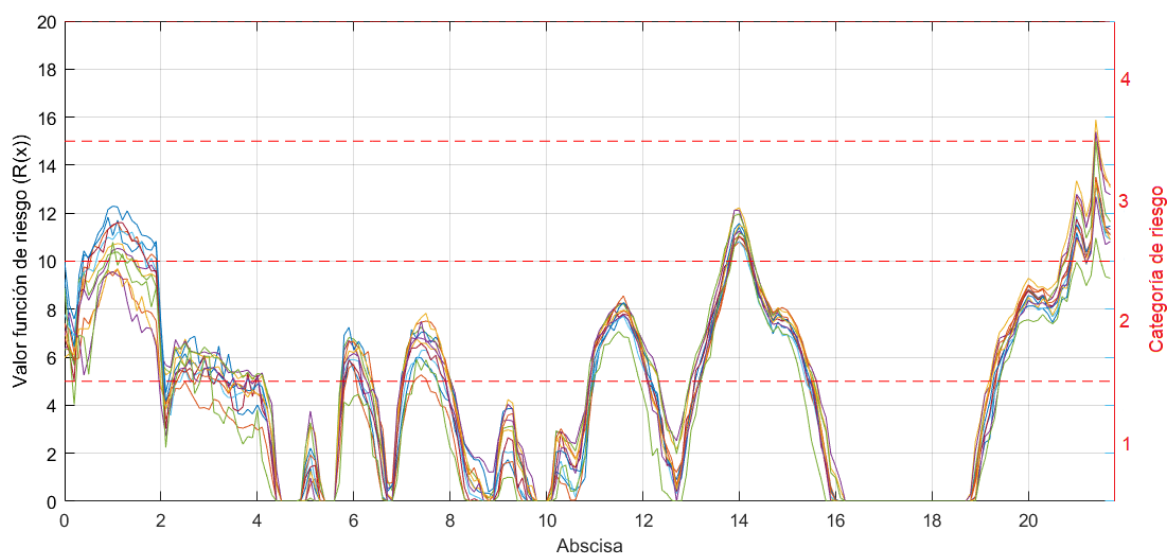
*Figura 6-8. Resultados del modelo de riesgo por encallamiento en época húmeda (noviembre)*

En el sector de la desembocadura entre el K0 y el K2 dentro de todos los escenarios analizados se evidencia que aproximadamente un 15% y 25% del tiempo las restricciones de navegación son de categoría 4 o superior para meses en temporada húmeda y seca respectivamente en condiciones sin dragado. Para este nivel de riesgo, tomando en cuenta el calado operativo de referencia de 10 m, las embarcaciones tipo SUPRAMAX estarían condicionadas a movilizarse un calado inferior a 8.75 m, calado para el cual es necesario realizar el descargue en puertos cercanos o atender con labores intensivas de dragado dentro de estos porcentajes del tiempo para asegurar unas condiciones óptimas de ingreso bajo el factor de seguridad bajo la quilla manejado por DIMAR. El sector debe ser intervenido a través de obras de dragado para mitigar el posible riesgo de encallamiento o contacto

con el fondo, el cual puede repercutir en daños estructurales de la embarcación, generar problemas ambientales por derrames y detener la navegación por obstaculización del canal navegable.

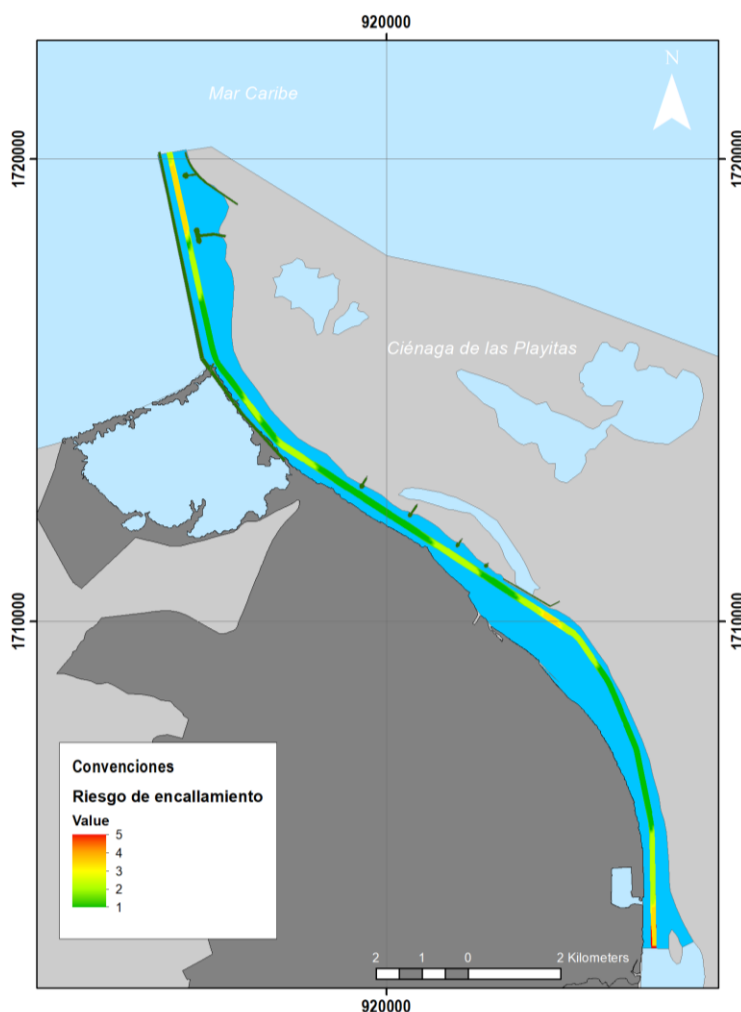
El sector del K14 y entre el K20 al K22 también presenta restricciones por profundidad en función del mes, siendo más significativas en época seca. El porcentaje de eventos catalogado como 4 y 5 pueden variar entre un 20% y 40% a lo largo del año. A pesar de que el análisis de riesgo muestra que el K14 que las condiciones de navegabilidad pueden llegar a ser considerables, actualmente se realizan labores de dragado que han mejorado las condiciones según lo reportado por DIMAR en sus informes de condiciones del río mas no presentan la información batimétrica de libre acceso.

En la Figura 6-9 se presentan los resultados promedio mensuales del modelo de riesgo por encallamiento generándose una envolvente de resultados según el valor de la función de riesgo  $R(x)$  y la categoría. En la Figura 6-10 se presenta especializados en mapa los resultados promedio para el mes más restrictivo (febrero) visualizando la categoría de riesgo esperada.



*Figura 6-9. Envolvente de resultados promedio mensuales de riesgo de encallamiento*

Las condiciones de navegabilidad pueden ser mejoradas a corto plazo a través de la programación de dragados acompañado de modelación hidromorfológica la cual puede ser aplicada al canal de acceso al puerto de Barranquilla (Doria, 2019; Paarlberg et al., 2015). Los resultados muestran principalmente que la profundidad del canal navegable es la variable más restrictiva por lo cual implementar un control y optimización a las labores de dragado permitiría mantener una condiciones óptimas del canal reduciendo costos.



*Figura 6-10. Resultados espaciales de categoría de riesgo de encallamiento interpolados en condiciones promedio anuales*

### 6.2.2 Riesgo de deriva por viento

Los resultados de viento los cuales son de importancia según el trimestre muestran que entre diciembre a febrero son de mayor magnitud y relevancia en la zona costera, su magnitud se reduce a medida que avanza en la plataforma continental. Dentro de la clasificación final de riesgo presentada en la Tabla 4-4 se esperaría, dentro de condiciones normales, un nivel de riesgo 3 el cual es tolerable dentro de la operatividad del puesto sin comprometer la navegación de embarcaciones. El análisis de riesgo no tiene en cuenta la ocurrencia de eventos de tormenta los cuales están influenciados y su efecto puntual requiere de ser analizados con un modelo de pronóstico y con seguimiento de la evolución de las condiciones meteorológicas.

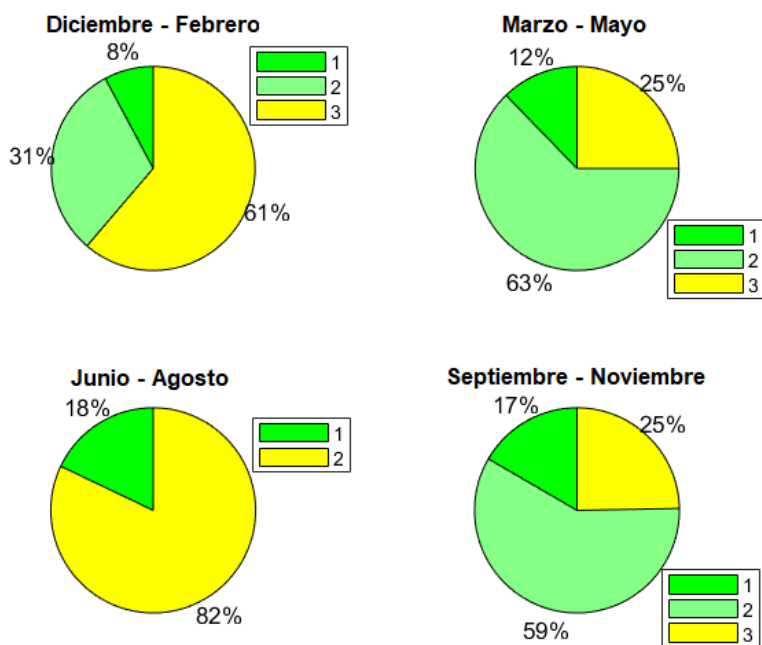


Figura 6-11. Diagrama circular de clasificación de resultados de riesgo para viento estación Boya Virtual

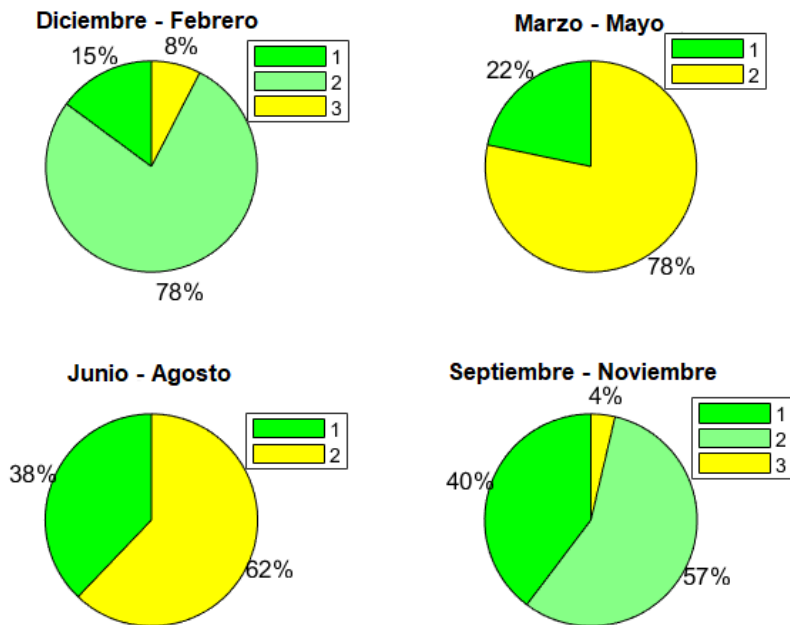


Figura 6-12. Diagrama circular de clasificación de resultados de riesgo para viento estación Las Flores

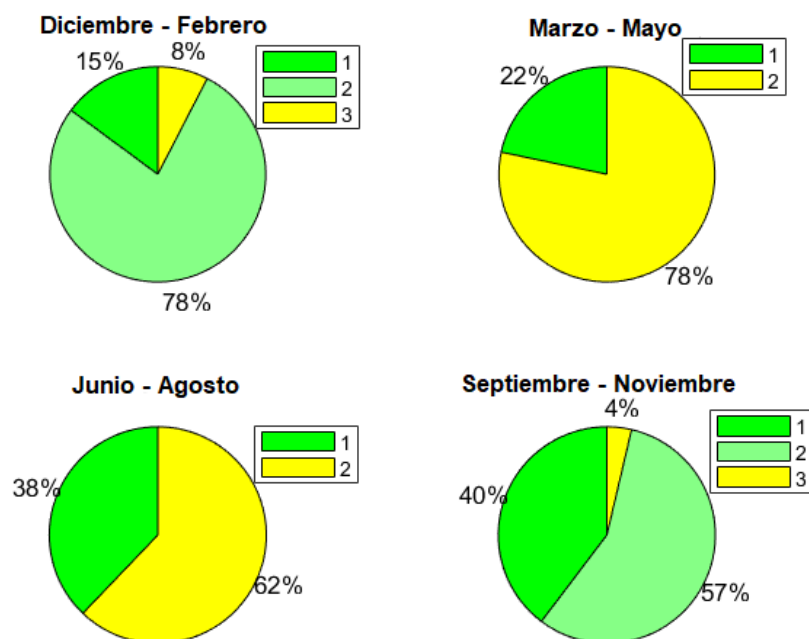


Figura 6-13. Diagrama circular de clasificación de resultados de riesgo para viento estación Escuela Naval

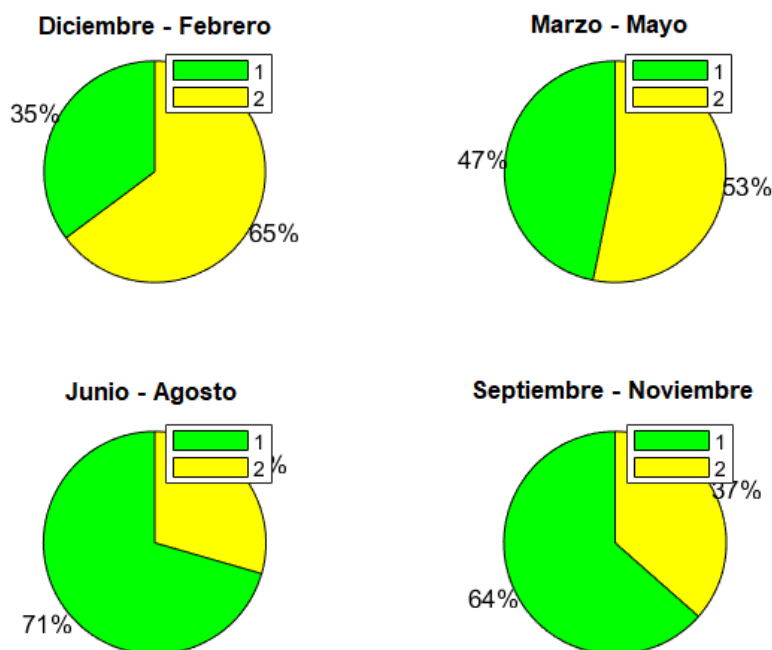
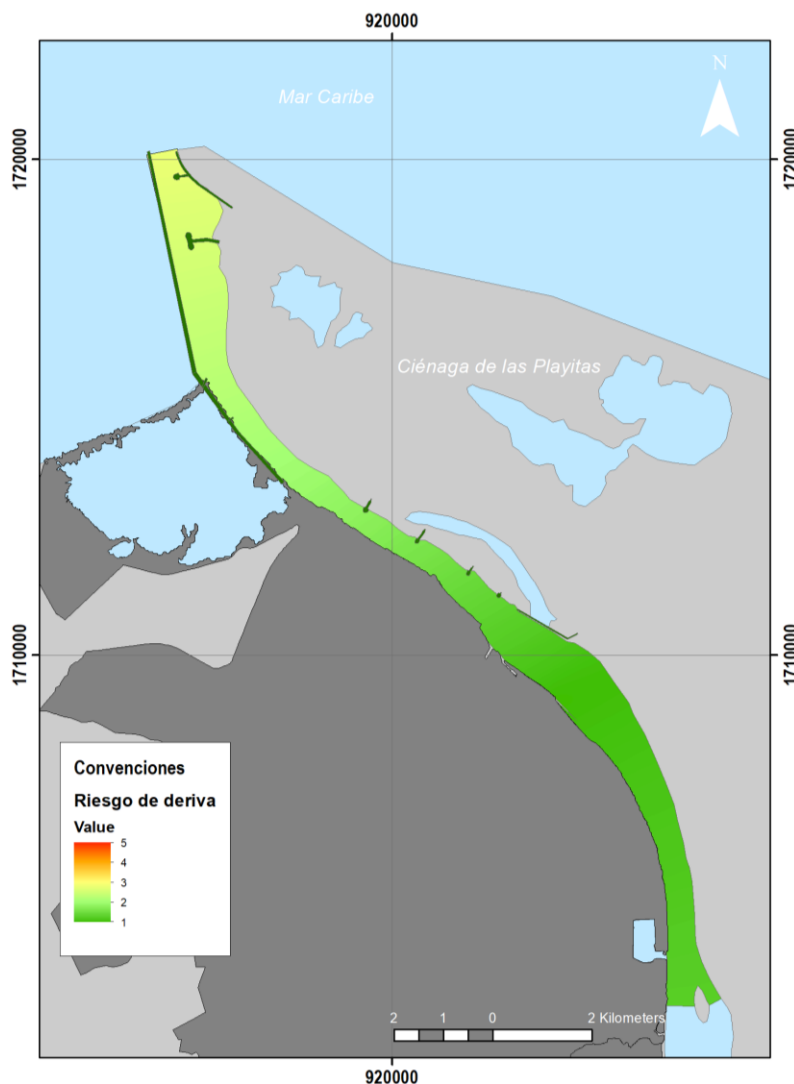


Figura 6-14. Diagrama circular de clasificación de resultados de riesgo para viento estación Ernesto Cortissoz

Los resultados obtenidos permiten caracterizar espacialmente la distribución del riesgo para diferentes probabilidades de ocurrencia. En la Figura 6-15 se presenta los resultados de riesgo espacialmente interpolados entre las cuatro estaciones de mediciones para la condición promedio

calculada en el primer trimestre el cual fue determinado anteriormente como en el que más riesgo de deriva se presenta.



*Figura 6-15. Resultados espaciales de categoría de riesgo de deriva por viento interpolados en condiciones promedio diciembre-febrero*

### 6.2.3 Riesgo de pérdida de maniobrabilidad por oleaje

La magnitud de oleaje representa un riesgo considerable dentro las operaciones marítimas al ingreso del canal navegable. La Figura 5-36 mostrada anteriormente presenta que existe una tendencia entre la magnitud del viento y la altura de ola, por lo cual se espera que en los meses de mayor incidencia del viento también sea mayor la altura de ola presente. Los datos obtenidos de la Boya virtual permiten identificar que en un 14% y 6% del tiempo la categoría de riesgo estaría catalogada como 5, lo cual



restringe la navegación entre noviembre a febrero. También son relevantes los resultados obtenidos de riesgo de categoría 4 y deben tenerse presentes ya que su porcentaje puede llegar a ser superiores al 10 % en casi todo el año.

De igual forma se indica que estos resultados deben complementarse con modelaciones hidrodinámicas y de propagación de oleaje que tengan un dominio computacional costero y fluvial para estimar la altura y periodo de ola en la zona de desembocadura de una forma más precisa. Se debe buscar una correcta estimación de estos parámetros teniendo en cuenta la interacción de la estructuras de encauzamiento en los procesos de transformación del oleaje para definir espacialmente los resultados en canal navegable exterior.

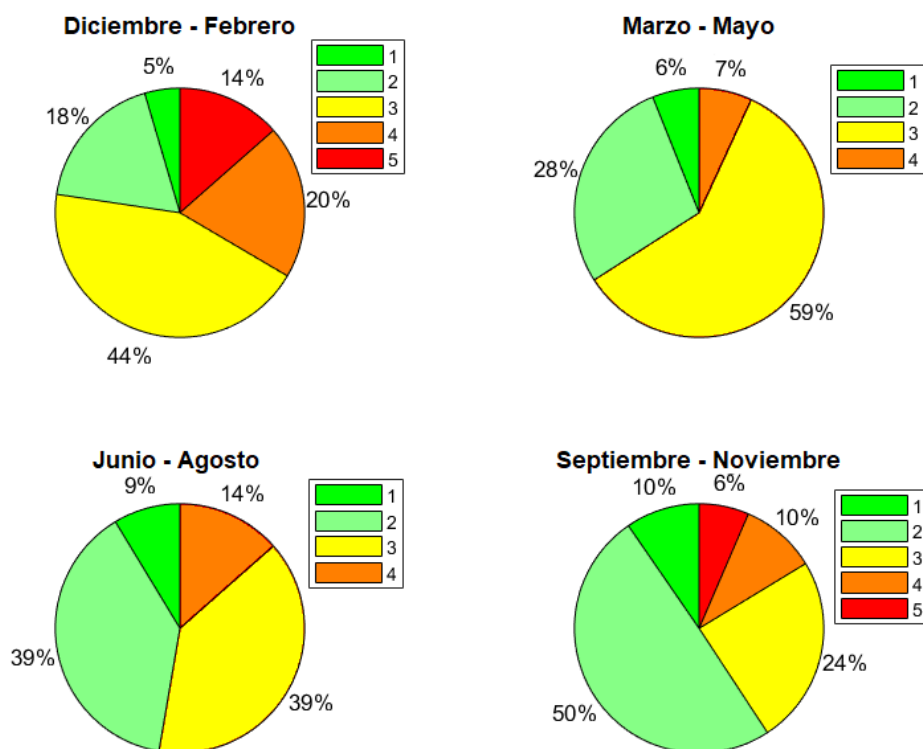
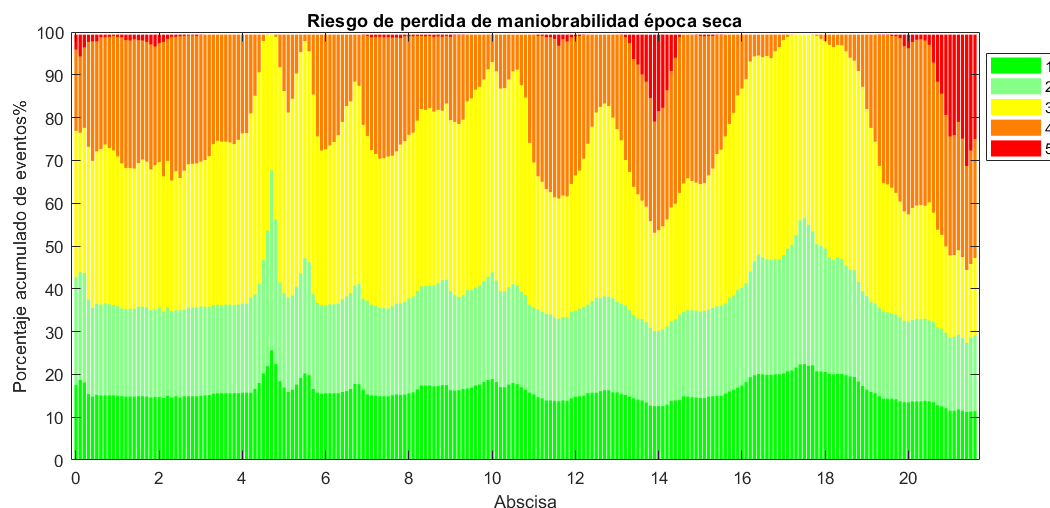


Figura 6-16. Diagrama circular de clasificación de resultados de riesgo para oleaje

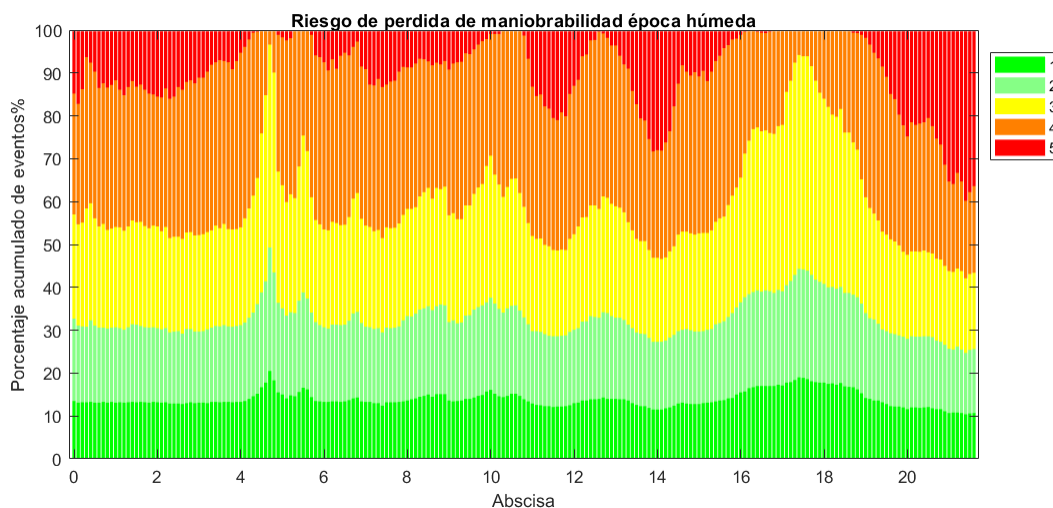
#### 6.2.4 Riesgo de pérdida de maniobrabilidad por velocidad de la corriente

El puerto de Barranquilla al estar ubicado en un delta predominantemente fluvial presenta condiciones diferentes de maniobrabilidad para las embarcaciones dependiendo si esta se encuentra arribando o saliendo del puerto. Los resultados del modelo de riesgo en cuanto a velocidad y maniobrabilidad de la embarcación en el puerto muestran que el sector de estudio está altamente condicionado al caudal presente en el río el cual fluctúa estacionalmente. En la condición de una embarcación partiendo del puerto, en escenario de altos caudales (Figura 6-18), la maniobrabilidad y estabilidad de la embarcación estaría comprometida cerca del 45% del tiempo debido a la velocidad relativa de la

misma y la capacidad de maniobra. Dada la consideración de que la embarcación se desplaza a la máxima velocidad posible, el riesgo de pérdida de maniobrabilidad se puede mitigar reduciendo la velocidad de desplazamiento, esto sin embargo, dejaría en una condición de alta exposición a la embarcación frente a otros forzamientos meteorológicos como lo es la condición de deriva por viento, la mitigación de un riesgo puede conllevar a la propagación de otro.



*Figura 6-17. Resultados del modelo de riesgo por pérdida de maniobrabilidad en época seca para embarcación saliendo del puerto (febrero)*



*Figura 6-18. Resultados del modelo de riesgo por pérdida de maniobrabilidad en época húmeda para embarcación saliendo del puerto (noviembre)*

En el caso de embarcaciones arribando al puerto los resultados del modelo de riesgo muestran que las condiciones de navegabilidad no presentan mayores inconvenientes con resultados de nivel de riesgo 1 y 2 principalmente. Esto se debe principalmente a que la embarcación tiene mayor habilidad para maniobrar si la corriente se desplaza en contra al rumbo del buque, siempre y cuando el buque se desplace a una velocidad mayor respecto al río.

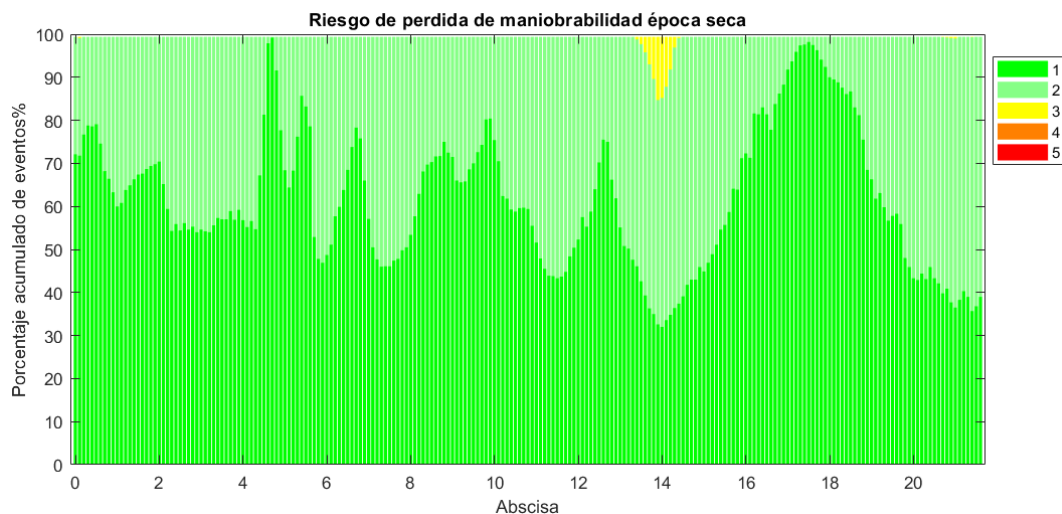


Figura 6-19. Resultados del modelo de riesgo por pérdida de maniobrabilidad en época seca para embarcación arribando al puerto (febrero)

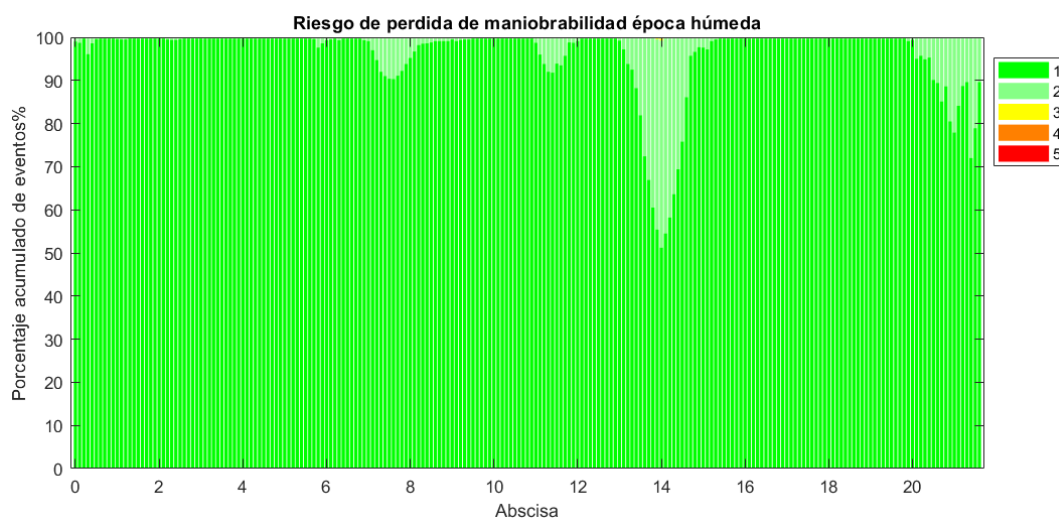


Figura 6-20. Resultados del modelo de riesgo por pérdida de maniobrabilidad en época húmeda para embarcación arribando al puerto (noviembre)

### 6.2.5 Riesgo de navegabilidad conjunta

Anteriormente se presentaron los resultados de riesgo para cada una de las variables hidrometeorológicas analizadas. Sin embargo, todas las variables actúan en conjunto y se presentan al mismo tiempo sobre el sector de estudio, por lo cual es necesario evaluar cómo es la interacción y distribución de riesgo conjunto. Para el cálculo del riesgo global conjunto  $R_c$  se procede a través de un promedio ponderado en el cual cada resultado de riesgo  $R_i$  de las variables analizadas tiene su

coeficiente de ponderación  $\alpha_i$  en función de la importancia que se le dé a la variable dentro del análisis de riesgo.

$$R_C = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (31)$$

Para el análisis de riesgo en el puerto de Barranquilla se tuvieron en cuenta entre el K0 al K2 las cuatro variables de relevancia (velocidad de corriente, viento, profundidad y oleaje) principalmente porque la influencia del oleaje se tiene contemplado dentro de los parámetros de DIMAR para la generación de los factores de seguridad hasta esta abscisa. Para el sector comprendido entre el K2 al K22 el riesgo global se calcula a partir de las variables de viento, profundidad y velocidad del flujo únicamente. En todos los casos los coeficientes de ponderación  $\alpha_i$  se consideran igual 1, sin embargo, estos pueden ser modificados dentro del modelo de riesgo conjunto si la autoridad marítima lo define.

Al realizar la ponderación se obtiene que la navegación en condiciones promedio mensuales se realiza bajo las categoría de riesgo 3 en la zona del canal de aproximación y de categoría 2 en resto del sector de estudio. Estos resultados de forma general indican que a pesar de que no se restringe la actividad de navegación si se requiere del monitoreo constante de las condiciones hidrometeorológicas a lo largo del año, con énfasis especial en los meses de diciembre a febrero debido al forzamiento costero y bajos niveles; y entre julio y septiembre meses en los cuales el hidrograma también tiende a descender en niveles. Los resultados de riesgo conjunto de varios meses del año se presentan en la Figura 6-21, Figura 6-22, Figura 6-23 y Figura 6-24.

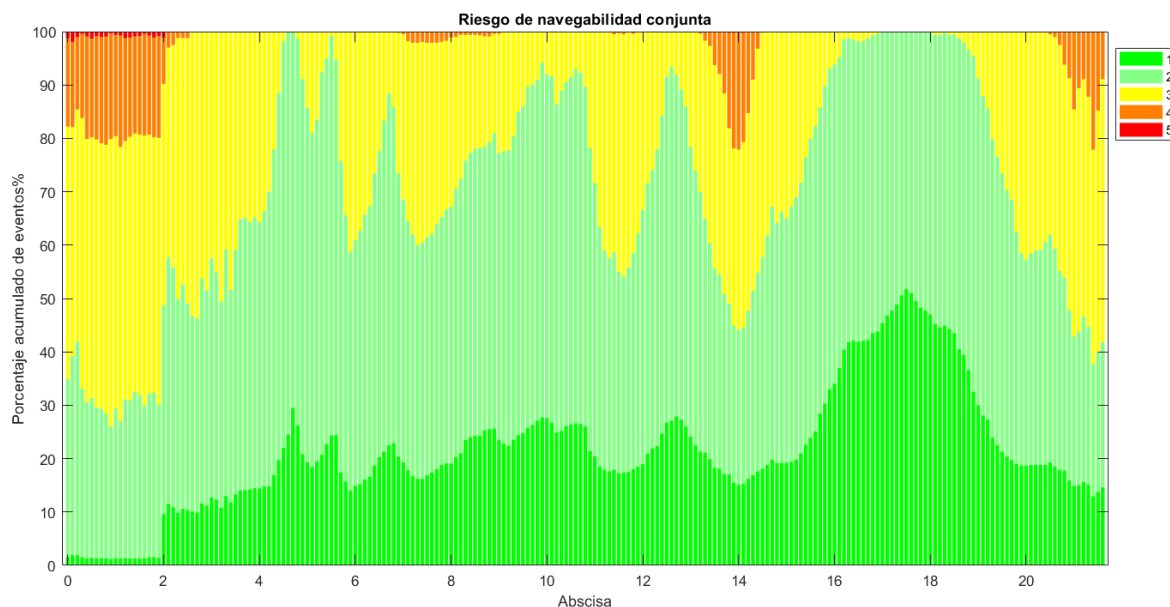
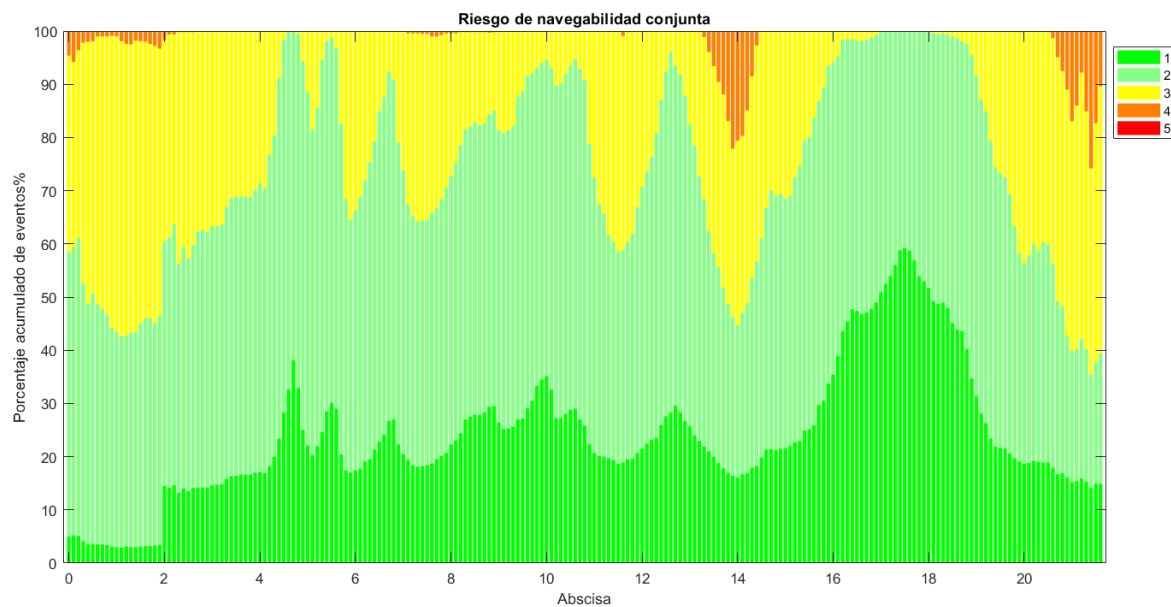
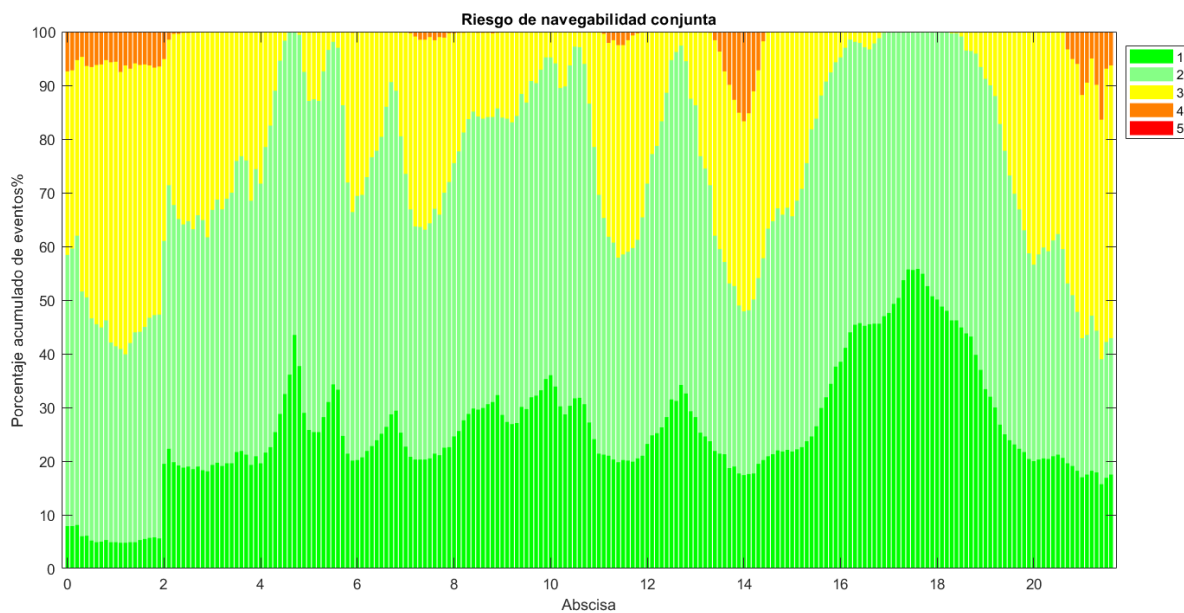


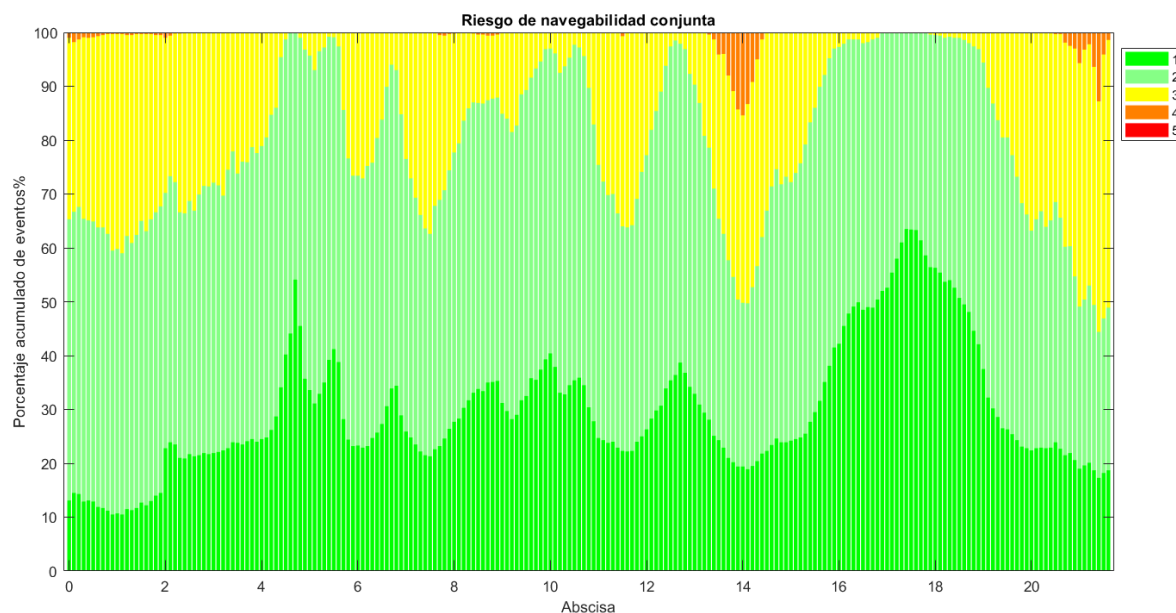
Figura 6-21. Resultados de riesgo de navegabilidad conjunta para el mes de enero



*Figura 6-22. Resultados de riesgo de navegabilidad conjunta para el mes de abril*



*Figura 6-23. Resultados de riesgo de navegabilidad conjunta para el mes de julio*



*Figura 6-24. Resultados de riesgo de navegabilidad conjunta para el mes de octubre*

A pesar de que los resultados de riesgo conjunto sugieren que las condiciones de navegabilidad son de categoría 3 o inferior en más del 90% del tiempo en la mayoría de los meses, igualmente se requiere de un análisis de las variables por separado, ya que como se evidencio, por ejemplo, en el Capítulo 7.2.2 el riesgo que representa la magnitud del viento disminuye a lo largo del canal navegable por lo cual disminuye el valor de riesgo conjunto. Además, el riesgo de encallamiento varia en funcion del mes evaluado según el régimen hidrológico, es por esto por lo que los resultados de riesgo conjunto se muestran a modo de caracterizar de forma general los posibles escenarios de navegación para la toma de decisiones.

## 7 CONCLUSIONES

La presente tesis de investigación tuvo como objetivo principal el desarrollo de un modelo para el análisis de riesgo en las actividades portuarias que se desarrollan en el puerto de Barranquilla en función a las variables hidrometeorológicas más representativas. La metodología planteada permitió la integración de mesas de trabajo con expertos siguiendo la metodología HAZOP junto con el análisis estadístico y numérico de las variables de análisis para generar un modelo tanto espacial como temporal para determinar el riesgo presente en la actividad de navegación en el puerto y definir condiciones de operatividad

Los resultados obtenidos permitieron identificar que la navegación se ve comprometida principalmente por el forzamiento del viento, la altura de ola, la profundidad del canal navegable, y velocidad de la corriente en el caso de una embarcación saliendo del puerto. La influencia de la marea al ser un proceso cíclico, predecible y de poca amplitud no se tuvo en cuenta dentro del análisis operativo, pero se requiere profundizar en la influencia de mareas astronómicas o de tormenta dentro de la operatividad. Cada una de las variables hidrometeorológicas analizadas varían tanto en magnitud como en probabilidad de ocurrencia en función del trimestre analizado a lo largo del año.

Al analizar como las variables de origen fluvial influyen en la navegación se determina que el caudal presente en río condiciona las restricciones por margen de seguridad bajo la quilla de la embarcación (UKC) y la velocidad de la corriente, variables que pueden ser bastante variables según el mes. En meses de bajos caudales como febrero y marzo a pesar de que la velocidad de la corriente es baja, los bajos niveles limitan el calado operativo de las embarcaciones. Esto se evidencia en los gráficos de categorías de riesgo, en donde la probabilidad de que la categoría sea mayor o igual a 4 es de 0.2 en febrero (bajos caudales) y de 0.15 en noviembre (caudales altos) en la zona de la desembocadura, y puede ser mayor en zonas puntuales aguas arriba. Para esto, reducir el riesgo por encallamiento requiere de mantener las actividades de dragado en los sectores críticos identificados (K0 – K2, K14, K20 – K22); para esto el uso del modelo de entropía permitió caracterizar morfológicamente el canal navegable a través de un análisis estadístico, su implementación permitió obtener información faltante de geometría hidráulica ya que no se disponen de batimetrías mensuales de libre acceso y puede ser una herramienta de fácil uso para el monitoreo del canal navegable.

De igual forma entre diciembre a febrero se evidencian que los forzamientos meteorológicos en la zona costera son significativamente mayores a otras estaciones climáticas. En este periodo del año deben tenerse en cuenta que la velocidad del viento y la altura de ola puede restringir la navegación cerca de un 35% del tiempo. A nivel anual, a finales de noviembre en transición a diciembre los registros estacionales de las variables costeras tienden a aumentar en magnitud, por lo cual debe tenerse en cuenta dentro de la operatividad del puerto programando el arribo de embarcaciones que no sean tan susceptibles frente a los forzamientos costeros. Los resultados de oleaje requieren de ser modelados como trabajo futuro a través de modelos que representen los fenómenos de refracción y difracción del oleaje que ocurren en la desembocadura debido a las obras de encauzamiento. A su vez, los resultados deben ser validados con mediciones realizadas en campo o la instalación de un equipo de medición permanente en la zona, lo cual fue recomendado ampliamente dentro de la mesa de trabajo con expertos. Los resultados generales del modelo de riesgo sugieren que la mejor época

para la navegación en el puerto de Barranquilla es en los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre donde las condiciones climáticas son de menor magnitud de niveles y velocidades del río aceptables para la navegación. Las autoridades competentes del puerto deben complementar su labor de control con el monitoreo constante de las condiciones del río, esto implica la instalación de equipos de medición de variables como viento, oleaje y marea en la desembocadura, al igual que la planeación de dragados con batimetrías de monitoreo y la modelación extensiva de las condiciones del río para los meses identificados dentro de la presente investigación como meses críticos. La integración de los resultados del modelo de riesgo junto con el monitoreo y predicción de variables permitiría definir escenarios probables para el arribo y zarpe de embarcaciones en el puerto a corto y mediano plazo y así planificar la actividad portuaria para el aumento de carga transportada y la reducción de aligeramiento de carga en puertos cercanos.

Los resultados del análisis de riesgo para el puerto de Barranquilla son una herramienta y punto de partida para que este mismo tipo de estudios e investigaciones sean realizadas en los diferentes puestos de Colombia y de la región, buscando que se tengan en cuenta dentro de los lineamientos de operatividad de los puertos y que sean discutidos en proyectos nacionales como lo es el Plan Maestro Fluvial u otras normativas y planes de desarrollo que se consideren en el futuro. De igual forma la presente investigación genera lineamientos metodológicos para la definición de políticas y medidas operativas de modo que sean implementadas dentro de los análisis seguridad náutica y permita ser tanto replicado como validado a nivel internacional. Se busca que este tipo de análisis sean un capítulo independiente dentro de las diferentes guías y recomendaciones internacionales en diseños de canales navegables tanto marítimos como fluviales y que sean acompañados por la intervención de otras áreas como logística, control portuario, economía, ingeniería naval, psicología, meteorología entre otras.

Concluyendo, la metodología desarrollada muestra ser una herramienta que aporta a la planificación de la actividad portuaria tanto para los navieros como para los navegantes al poder identificar las problemáticas que se reportan constantemente y poder representar de forma cuantitativa la magnitud de los posibles forzamientos al momento de navegar. La investigación a su vez está vinculada a ser una herramienta para las entidades encargadas del mantenimiento y control del canal navegable buscando que se planifiquen las actividades de dragado en los puntos críticos y se determinen las condiciones de ingreso y salida de embarcaciones bajo un nivel de seguridad establecido.

### **Investigaciones futuras**

Dentro de las temáticas que abordadas en la investigación se evidencia que es necesario ampliar la aplicación de modelos hidrodinámicos y de propagación de oleaje especializados para la zona costera, los forzamientos costeros tienen una gran influencia en la navegación en el sector del canal exterior y de aproximación. De igual forma se requiere un trabajo conjunto en la aplicación de modelos tanto físicos como numéricos para investigar la interacción flujo-embarcación específicamente para las condiciones que se presentan en el puerto de Barranquilla, la aplicación de estos modelos permitiría determinar a través de relaciones más precisas la interacción de la embarcación frente a cada una de las variables de análisis, y es un proceso discutido como una necesidad dentro de las guías de diseño de canales navegables como un estudio complementario.



La operatividad del puerto se verá afectada a futuro debido a la incidencia del cambio climático, se hace necesaria la investigación sobre las posibles afectaciones que tendría el aumento del nivel del mar y el aumento tanto en frecuencia como en magnitud de eventos como el ENSO o tormentas tropicales. Otro de los temas que deben ser estudiados es la integración del modelo de riesgo operativo ya generado con modelos de pronóstico a corto y mediano plazo que permitan una planificación de arribo y salida de embarcaciones. Esto requiere de trabajo e investigación conjunta con diferentes equipos de trabajo, y la disposición de datos medidos en tiempo real de mareógrafos, estaciones meteorológicas y batimétricas que disponen diferentes entidades para el monitoreo constante de las condiciones hidrometeorológicas en el sector de estudio.

## 8 REFERENCIAS

- Acuña, G. J., Ávila, H., & Canales, F. A. (2019). River model calibration based on design of experiments theory. A case study: Meta River, Colombia. *Water (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/w11071382>
- Alvarado, M. (Ed.). (2009). *Río Magdalena, Navegación Marítima y Fluvial* (Primera Ed). Barranquilla: Ediciones Uninorte.
- Alza, K., & Ramirez, C. (2018). *Perspectiva global de los puertos del caribe de Colombia*. Universidad del Rosario.
- Ambagts, L., Jansen, W., de Jong, N., Kusters, A., Oerlemans, C., & Slockers, A. (2018). *Sedimentation in the mouth of the Magdalena river Improving navigability in the port of Barranquilla*. TU Delft.
- Andrews, J., & Moss, T. (2002). *Reliability and Risk Assessment* (Second Edi). London: Professional Engineering Publish Limited.
- Arcement, G. J., & Schneider, V. (1989). *Guide for Selecting Manning 's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. Denver, CO.
- Asoportuaria. (2020). *Consolidado 2018-2020 de arribo y zarpe de embarcacion en el puerto de Barranquilla*. Barranquilla.
- Bemal, G. (1996). CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LA LLANURA DELTAICA DEL RIO MAGDALENA CON ÉNFASIS EN EL SISTEMA LAGUNAR DE LA CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA, COLOMBIA. *Boletín Investigaciones Maritimas y Costeras*, 25(1), 19–48.
- Cañizares, R., Alfageme, S., & Mahoney, T. (2007). Design of Navigation Channel Deepening Works Using a Morphological Model in Barranquilla, Columbia. *Coastal Sediments '07*, 2345–2357. [https://doi.org/10.1061/40926\(239\)184](https://doi.org/10.1061/40926(239)184)
- Card, A., Ward, J., & Clarkson, J. (2012). Beyond FMEA : The structured what-if technique ( SWIFT ). *AMERICAN SOCIETY FOR HEALTHCARE RISK MANAGEMENT*, 31(4), 23–29. <https://doi.org/10.1002/jhrm>
- CIIC. (2020). *ZONAS Y VOLUMENES DRAGADOS DESDE 2005 HASTA 2019 EN EL PUERTO MARÍTIMO Y FLUVIAL DE BARRANQUILLA*. Barranquilla.
- Deltares. (2020a). Delft3D 4 Suite (structured). Retrieved from <https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-4-suite/>
- Deltares. (2020b). Delft3D Flexible Mesh Suite. Retrieved from <https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-flexible-mesh-suite/>
- DHI. (2004). *MIKE 21C RIVER MORPHOLOGY*. DHI Water & Environment.
- Dirección General de Puertos. (2008a). Modos de Transporte. In *Manual de Dimensionamiento Portuario* (pp. 1–27). Ciudad de Mexico.
- Dirección General de Puertos. (2008b). Puertos Generales. In *Manual de Dimensionamiento Portuario* (p. 278). Retrieved from <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/CGPMM/PNDP2008/doc/mdi/dcap05.pdf>

- DNV GL. (2018). *Navigational Safety Risk Assessment for South Fork Winf Farm*. Montauk.
- Doets, I. (2015). *The effects of Islands in the Río Magdalena on Discharge and Sediment Transport into the canal del Dique, Colombia*. Retrieved from <http://84.88.0.227/record=b1896736#>
- Doria, R. (2019). *Metodología Para La Programación De Dragados A Partir Del Régimen Hidrológico*. Universidad del Norte.
- Eloot, K., Verwilligen, J., & Vantorre, M. (2008). An overview of squat measurements for container ships in restricted water. *International Conference on Safety and Operations in Canals and Waterways SOCW 2008 1516 September 2008 Glasgow UK*, (April 2015), 106–116.
- Euscategui, C., & Hurtado, G. (2011). Análisis del impacto del fenómeno “LA NIÑA” 2010-2011 En la hidroclimatología del país. *II Congreso Internacional Del Clima*, (571), 3421586. Retrieved from <https://bit.ly/2no145b>
- Findeter, & Cormagdalena. (2019). *ESTUDIO PREVIO PARA LA CONTRATACIÓN DEL PROYECTO DENOMINADO: “MANTENIMIENTO DEL CANAL NAVEGABLE MEDIANTE DRAGADO HIDRÁULICO Y MECÁNICO EN EL RÍO MAGDALENA EN EL SECTOR COMPRENDIDO ENTRE BARRANCABERMEJA (SANTANDER) Y PINILLOS (BOLÍVAR).”* Bogotá D.C.
- Findeter, & Cormagdalena. (2020). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MANTENIMIENTO DEL CANAL NAVEGABLE CONCEPTUAL DE REFERENCIA 2020 MEDIANTE DRAGADO DEL CANAL DE ACCESO AL PUERTO DE BARRANQUILLA – DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO*. Bogotá D.C.
- Frostick, L. E., McLelland, S. J., & Mercer, T. G. (2011). Users Guide to Physical Modelling and Experimentation: Experience of the HYDRALAB Network. In *CRC Press*. Retrieved from <https://www.crcpress.com/Users-Guide-to-Physical-Modelling-and-Experimentation-Experience-of-the/Frostick-McLelland-Mercer/p/book/9780415609128>
- Gomez, F. J., Gutierrez, R. R., Biswell, J., Doria, R., & Rivillas-Ospina, G. (2019). MORPHODYNAMICAL CHANGES IN MAGDALENA RIVER DELTA ( COLOMBIA ) AND ITS INFLUENCE IN RIVERINE POPULATIONS. In M. Bahadir (Ed.), *Water in Agricultural Practices: Training the Trainers. Water Perspectives in Emerging Countries* (p. 300). Göttingen: Cuvillier Verlag.
- Gourlay, T. P. (2003). Ship Squat in Water of Varying Depth. *International Journal of Maritime Engineering*, 145(1), 1–12.
- Häring, I. (2016). Risk analysis and management: Engineering resilience. *Risk Analysis and Management: Engineering Resilience*, 1–365. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0015-7>
- Hernández, H. (2018). *Variabilidad de la estratificación y mezcla en la desembocadura del Delta del Río Magdalena*. Universidad del Norte.
- Higgins, A., Restrepo, J. C., Ortiz, J. C., Pierini, J., & Otero, L. (2016). Suspended sediment transport in the Magdalena River (Colombia, South America): Hydrologic regime, rating parameters and effective discharge variability. *International Journal of Sediment Research*, 31(1), 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.04.003>
- Hu, S., Fang, Q., Xia, H., & Xi, Y. (2007). Formal safety assessment based on relative risks model

- in ship navigation. *Reliability Engineering and System Safety*, 92(3), 369–377.  
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.04.011>
- IDEAM. (2020). *PRONÓSTICO DE PLEAMARES Y BAJAMARES EN LA COSTA CARIBE COLOMBIANA*. Bogotá D.C.
- International Maritime Organization. (2020). Formal Safety Assessment. Retrieved from MSC-MEPC.2/Circ.5 website:  
<http://www.imo.org/es/ourwork/safety/safetytopics/paginas/formalsafetyassessment.aspx>
- INVIAS. (2020). *Presentación del resultado y conclusiones del estudio realizado por el INVIAS, para el mejoramiento de la infraestructura y navegación del canal de acceso al Puerto de Barranquilla*. Bogotá D.C.
- Karahalios, H. (2019). A Risk Assessment of Ships Groundings in Rivers: The Case of Parana River. *Journal of Navigation*. <https://doi.org/10.1017/S0373463319000936>
- Kreuzer, E., & Sichermann, W. (2005). Prediction of Extreme Ship Motions in Irregular Waverank, E Diebels,. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 5(1), 723–724.  
<https://doi.org/10.1002/pamm.200510>
- Kuo, C. (1998). *Managing Ship Safety*. London: LLP.
- Leopold, L. B., & Maddock, T. J. (1953). The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications (USGS Numbered Series No. 252). *Professional Paper. U. S. Government Printing Office, Washington, D.C*, 57. Retrieved from 10.3133/pp252
- Li, B. (2018). Navigation risk assessment scheme based on fuzzy Dempster–Shafer evidence theory. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15(5), 1–12.  
<https://doi.org/10.1177/1729881418799572>
- Li, S., Meng, Q., & Qu, X. (2012). An Overview of Maritime Waterway Quantitative Risk Assessment Models. *Risk Analysis*, 32(3), 496–512. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01697.x>
- Limerinos, J. T. (1970). *Determination of the Manning Coefficient From Measured Bed Roughness in Natural Channels*. Washington, D.C.
- Mao, L., & Chen, Y. (2018). Entropy-based approach of hydraulic geometry of navigable canals. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(11), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001709](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001709)
- MinTransporte. *Plan Maestro Fluvial de Colombia 2015*. , (2015).
- Monsalve, G. (2008). *Hidrología en la Ingeniería* (Primera Ed). Bogota: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Narváez, V. (2018). Canal de acceso pierde 1,4 m en una semana. *El Heraldo*.
- Navidi, W. (2007). *Estadística para ingenieros y científicos* (Primera Ed, Vol. 900).  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Nelson, J. M., Shimizu, Y., Abe, T., Asahi, K., Gamou, M., Inoue, T., ... Watanabe, Y. (2016). The international river interface cooperative: Public domain flow and morphodynamics software for education and applications. *Advances in Water Resources*, 93.  
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.017>

- Nezu, I., & Nakawaga, H. (1993). *Turbulence in Open Channel Flows* (First Edit). London: Taylor & Francis.
- Nowakowski, W., Lukasik, L., & Wojciechowski, J. (2017). A Method of Assessing the Safety of Technical Systems of the Ship. *12th International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 361–366. Gdynia, Poland.
- Observatorio del Río Magdalena - Universidad del Norte. (2020). Curvas de correlación de Caudales y Niveles - Monitoreo del Río Magdalena. Retrieved from <https://www.uninorte.edu.co/web/observatorio-del-rio-magdalena>
- OCDI. (2007). *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*. Tokyo.
- Organización Marítima Internacional. (1998). *Formal safety assessment: basic glossary of terms*. London.
- Organización Marítima Internacional. (2018). *MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2 / Revised Guidelines for FSA for use in the IMO rule-making process*. 12(0). Retrieved from <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/SafetyTopics/Documents/MS-C-MEPC-2-Circ-12-Rev-2.pdf>
- Ospino, S., Restrepo, J. C., Otero, L., Pierini, J., & Alvarez-Silva, O. (2018). Saltwater Intrusion into a River with High Fluvial Discharge: A Microtidal Estuary of the Magdalena River, Colombia. *Journal of Coastal Research*, 34(6), 1273. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-17-00144.1>
- Otero, A. (2012). El puerto de Barranquilla : Retos y recomendaciones. *Revista de Economía de Caribe*, 10, 126–159. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/ecoca/n10/n10a05.pdf>
- Otero, L. J., Ortiz-Royero, J. C., Ruiz-Merchan, J. K., Higgins, A. E., & Henriquez, S. A. (2016). Storms or cold fronts: What is really responsible for the extreme waves regime in the Colombian Caribbean coastal region? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(2), 391–401. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-391-2016>
- Özlem, Ş., Altan, Y. C., Otay, E. N., & Or, I. (2019). Grounding Probability in Narrow Waterways. *Journal of Navigation*. <https://doi.org/10.1017/S0373463319000572>
- Paarlberg, A. J., Guerrero, M., Huthoff, F., & Re, M. (2015). Optimizing dredge-and-dump activities for river navigability using a hydro-morphodynamic model. *Water (Switzerland)*, 7(7), 3943–3962. <https://doi.org/10.3390/w7073943>
- Patiño, K. (2018). El puerto de barranquilla y su infraestructura fluvial como eje para la competitividad de colombia. Universidad Militar Nueva Granada.
- Paulauskas, V. (2006). Navigational risk assessment of ships. *Transport*, 21(1), 12–18. <https://doi.org/10.1080/16484142.2006.9638034>
- Paulauskas, V., Paulauskas, D., & Wijffels, J. (2009). Ship safety in open ports. *Transport*, 24(2), 113–120. <https://doi.org/10.3846/1648-4142.2009.24.113-120>
- PIANC. (2014). *Report n° 121 - 2014 Harbour Approach Channels Design Guidelines*.
- PIANC. (2019). *InCom WG Report n° 141 - 2019 Design Guidelines For Inland Waterway Dimensions*.

- Pietrzykowski, Z. (2007). Assessment of Navigational Safety in Vessel Traffic in an Open Area. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 1(1), 85–88.
- Poveda, G. (2004). LA HIDROCLIMATOLOGÍA DE COLOMBIA: UNA SÍNTESIS DESDE LA ESCALA INTER-DECADAL HASTA LA ESCALA DIURNA por CIENCIAS DE LA TIERRA. *Revista Académica Colombiana de Ciencias de La Tierra*, 28(107), 201–222. Retrieved from [https://www.uninorte.edu.co/documents/266486/0/Poveda\\_2004.pdf](https://www.uninorte.edu.co/documents/266486/0/Poveda_2004.pdf)
- Puertos del Estado. (1995). *Acciones Climáticas II: Viento*. Madrid.
- Puertos del Estado. (2018). *ROM - Recomendaciones de Obras Marítimas*. Madrid.
- Raiyan, A., Das, S., & Islam, M. R. (2017). Event tree analysis of marine accidents in Bangladesh. *Procedia Engineering*, 194, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.146>
- Ran, L., Wang, S., & Lu, X. X. (2012). Hydraulic geometry change of a large river: A case study of the upper Yellow River. *Environmental Earth Sciences*, 66(4), 1247–1257. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1336-x>
- Restrepo, J. C. (2014). *Dinámica sedimentaria en deltas micromareales-estratificados de alta descarga: Delta del Río Magdalena (Colombia–Mar Caribe)* (Universidad del Norte). Retrieved from <http://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/7422>
- Restrepo, J. D. (2005). *Los sedimentos del río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental* (J. D. Restrepo, Ed.). Medellín: Editorial Universidad EAFIT.
- Rivillas-ospina, G., Bolívar, M., Maza, M., Ruiz, G., Casas, D., & Guerrero, R. (2020). Development and Implementation of the Application APPMAR 1.0. A Toolbox for Management of Meteorological and Marine Data on Limited Information Regions. *Preprint*, 1–18. <https://doi.org/10.20944/preprints202002.0237.v1>
- Schmied, L., & Cañizares, R. (2009). Design of River Training Structures Using Morphological Modeling in the Magdalena River, Colombia. *Estuarine and Coastal Modeling*, 566–581.
- Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423.
- Singh, V. (2014). *Entropy Theory in Hydraulic Engineering: An Introduction* (Reston, Vi). ASCE Press.
- SuperTransporte. (2020). *Boletín Estadístico Tráfico Portuario en Colombia*. Bogotá.
- Tung, Y.-K., & Yen, B.-C. (2005). *Hydrosystems Engineering Uncertainty Analysis*. <https://doi.org/10.1036/0071467084>
- U.S. Department of Homeland Security. (2010). *PORTS AND WATERWAYS SAFETY ASSESSMENT (PAWSA)*. Retrieved from <https://www.navcen.uscg.gov/?pageName=pawsaMain>
- Urbano, C., Otero, L., & Lonin, S. (2013). Influencia de las corrientes en los campos de oleaje en el área de Bocas de Ceniza, Caribe Colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 31, 191–206.
- Vargas, G. (2014). *Estudio geológico, geomorfológico, dinámica fluvial y alternativas de conexión al mar caribe*.



- Wang, L., Liu, Q., Dong, S., & Guedes Soares, C. (2019). Effectiveness assessment of ship navigation safety countermeasures using fuzzy cognitive maps. *Safety Science*, 117(December 2018), 352–364. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.04.027>
- Warner, F. (1992). *Risk: analysis, perception and management*. London: Royal Society.
- Wennink, C. J. (1992). Collision and Grounding Risk Analysis for Ships Navigating in Confined Waters. *Journal of Navigation*, 45(1), 80–90. <https://doi.org/10.1017/S0373463300010493>
- Xiong, H., & Wang, X. (2019). Effect of Leeway and Drift Angle of Ship Navigation and Determination Method. *MATEC Web of Conferences*, 267, 01005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926701005>
- Yan, X., & Zhang, D. (2014). Challenges and Developments in Navigational Risk Assessment. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 1–8.
- Zhang, D., Yan, X. P., Yang, Z. L., Wall, A., & Wang, J. (2013). Incorporation of formal safety assessment and Bayesian network in navigational risk estimation of the Yangtze River. *Reliability Engineering and System Safety*, 118, 93–105. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.04.006>
- Zhang, Di, Yan, X., Zhang, J., Yang, Z., & Wang, J. (2016). Use of fuzzy rule-based evidential reasoning approach in the navigational risk assessment of inland waterway transportation systems. *Safety Science*, 82, 352–360. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.10.004>
- Zhang, J., Teixeira, Â. P., Guedes Soares, C., Yan, X., & Liu, K. (2016). Maritime Transportation Risk Assessment of Tianjin Port with Bayesian Belief Networks. *Risk Analysis*, 36(6), 1171–1187. <https://doi.org/10.1111/risa.12519>
- Zhang, S., Jing, Z., Li, W., Wang, L., Liu, D., & Wang, T. (2019). Navigation risk assessment method based on flow conditions: A case study of the river reach between the Three Gorges Dam and the Gezhouba Dam. *Ocean Engineering*, 175(March 2017), 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.02.016>
- Zhang, X., Zhang, Q., Yang, J., Cong, Z., Luo, J., & Chen, H. (2019). Safety Risk Analysis of Unmanned Ships in Inland Rivers Based on a Fuzzy Bayesian Network. *Journal of Advanced Transportation*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4057195>

## 9 ANEXOS

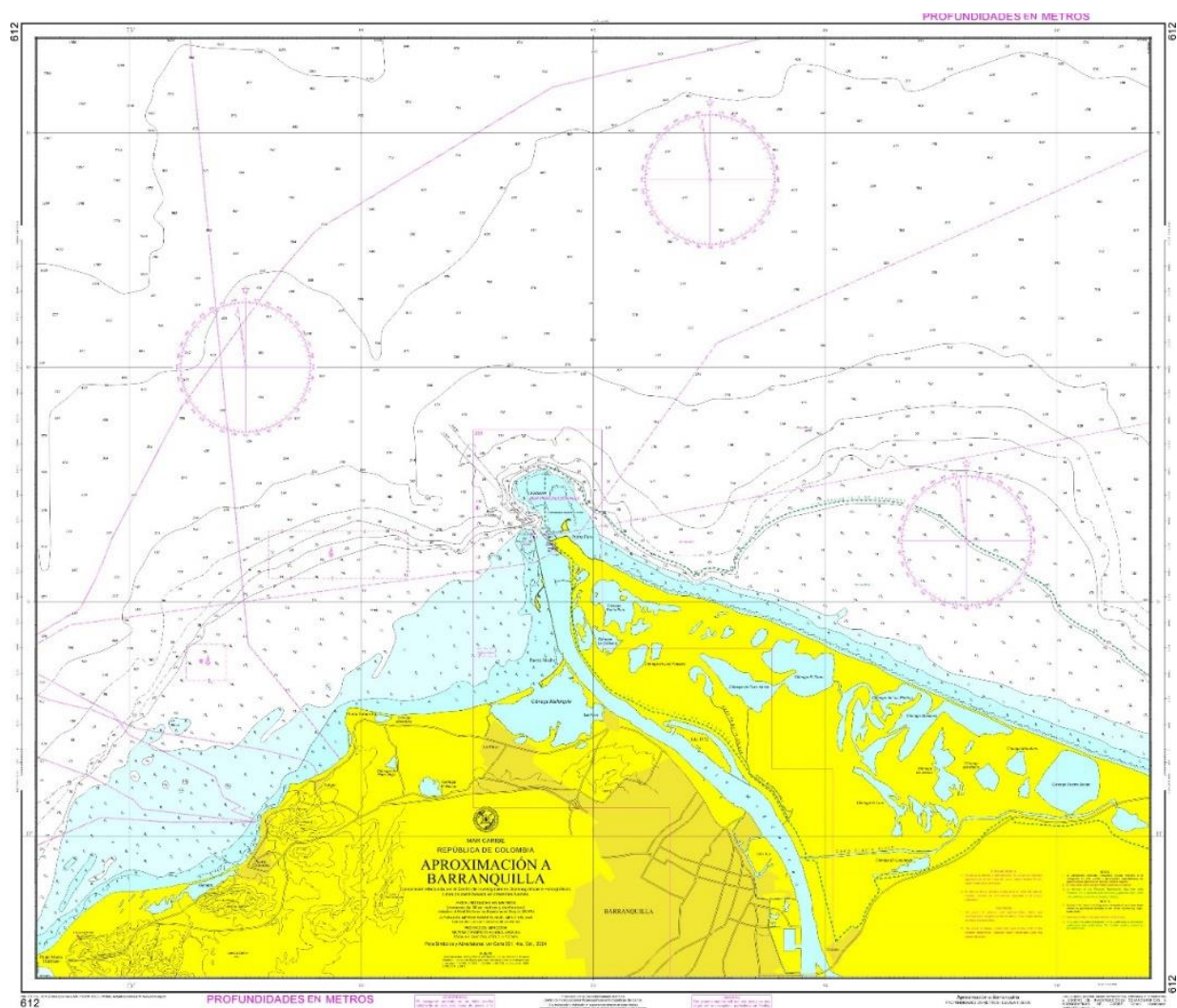


Figura 9-1. Carta náutica de aproximación a la zona portuaria de Barranquilla. (DIMAR, 2011)



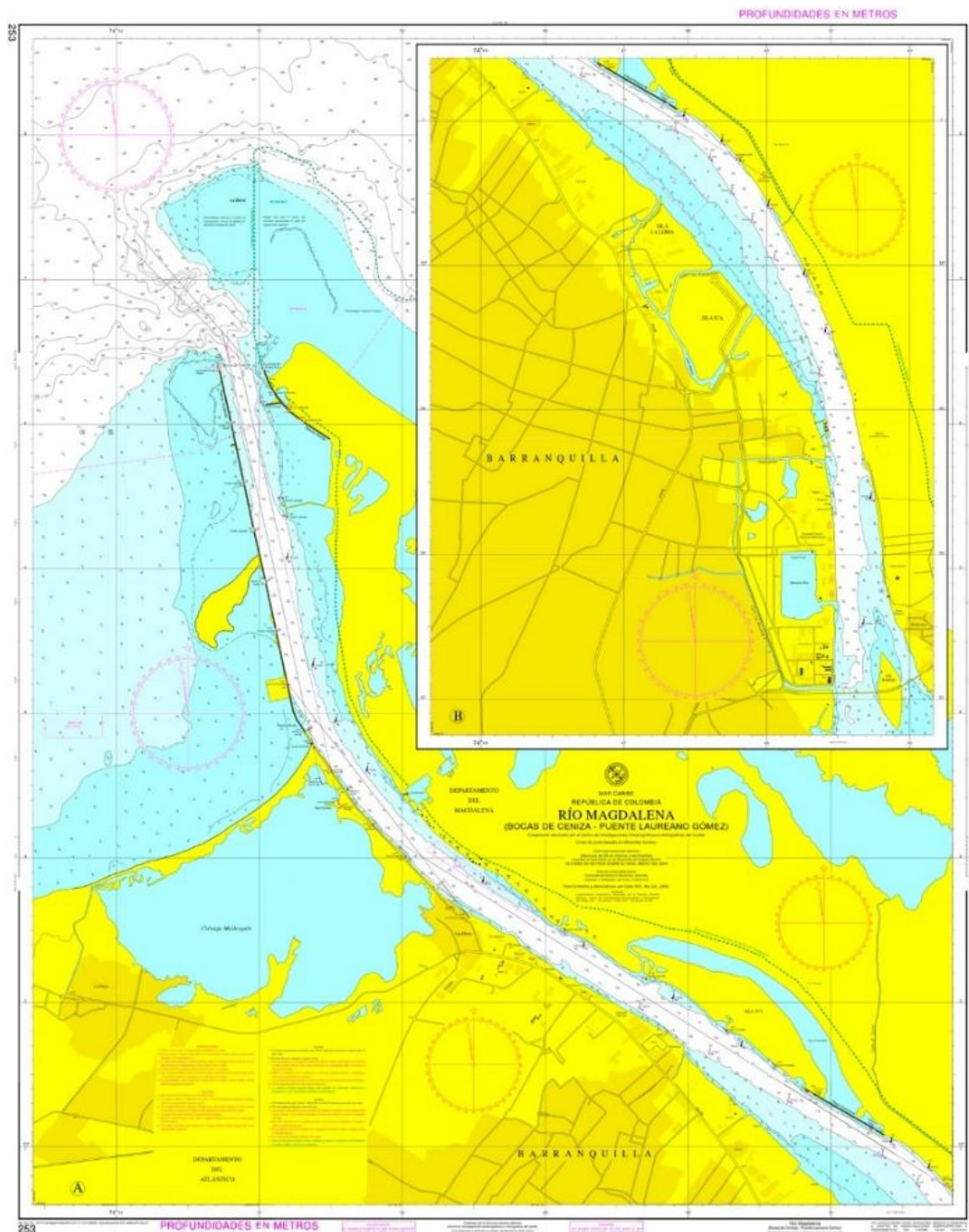
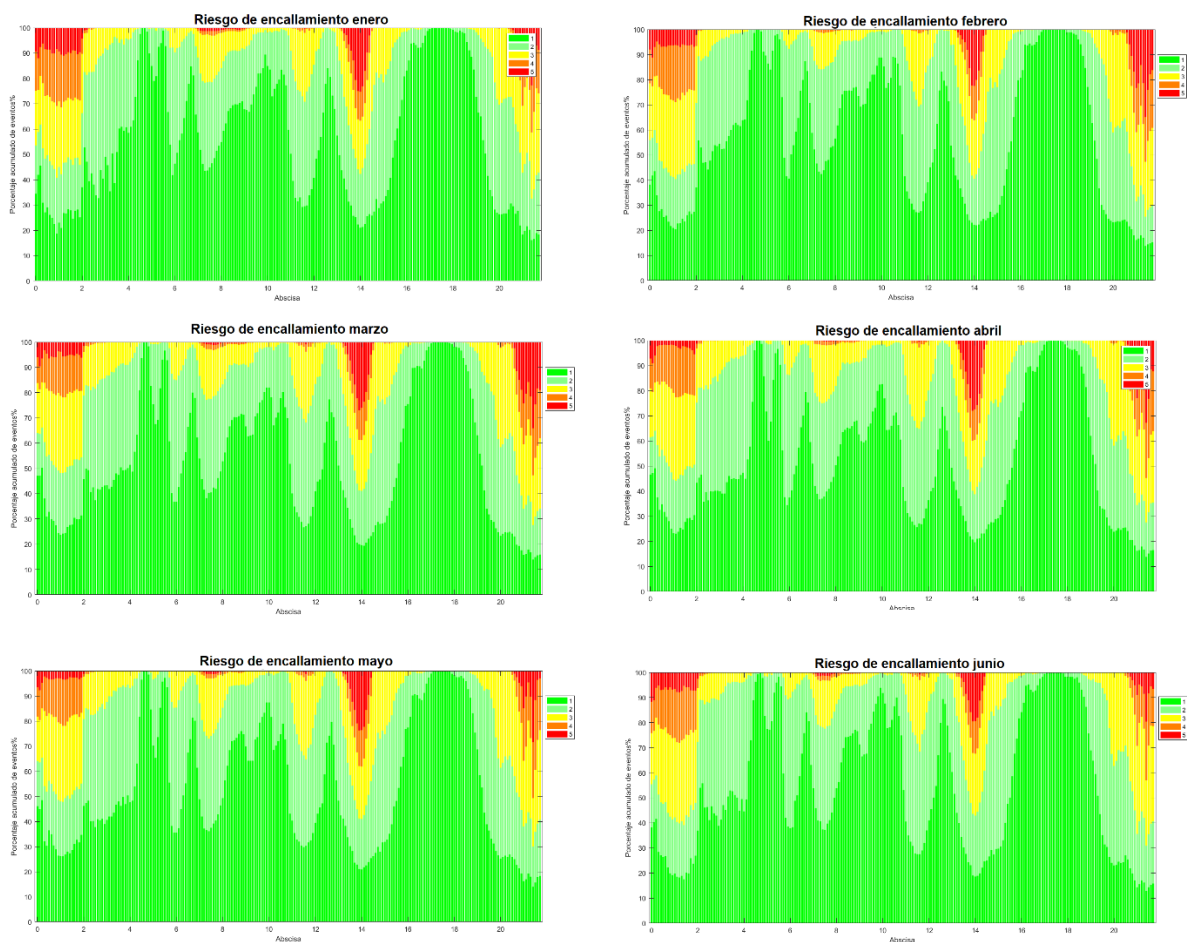


Figura 9-2. Carta náutica Río Magdalena-Sector portuario de Barranquilla. (DIMAR, 2011)





*Figura 9-4. Resultados del modelo de riesgo para encastillamiento en el sector de estudio enero a junio*

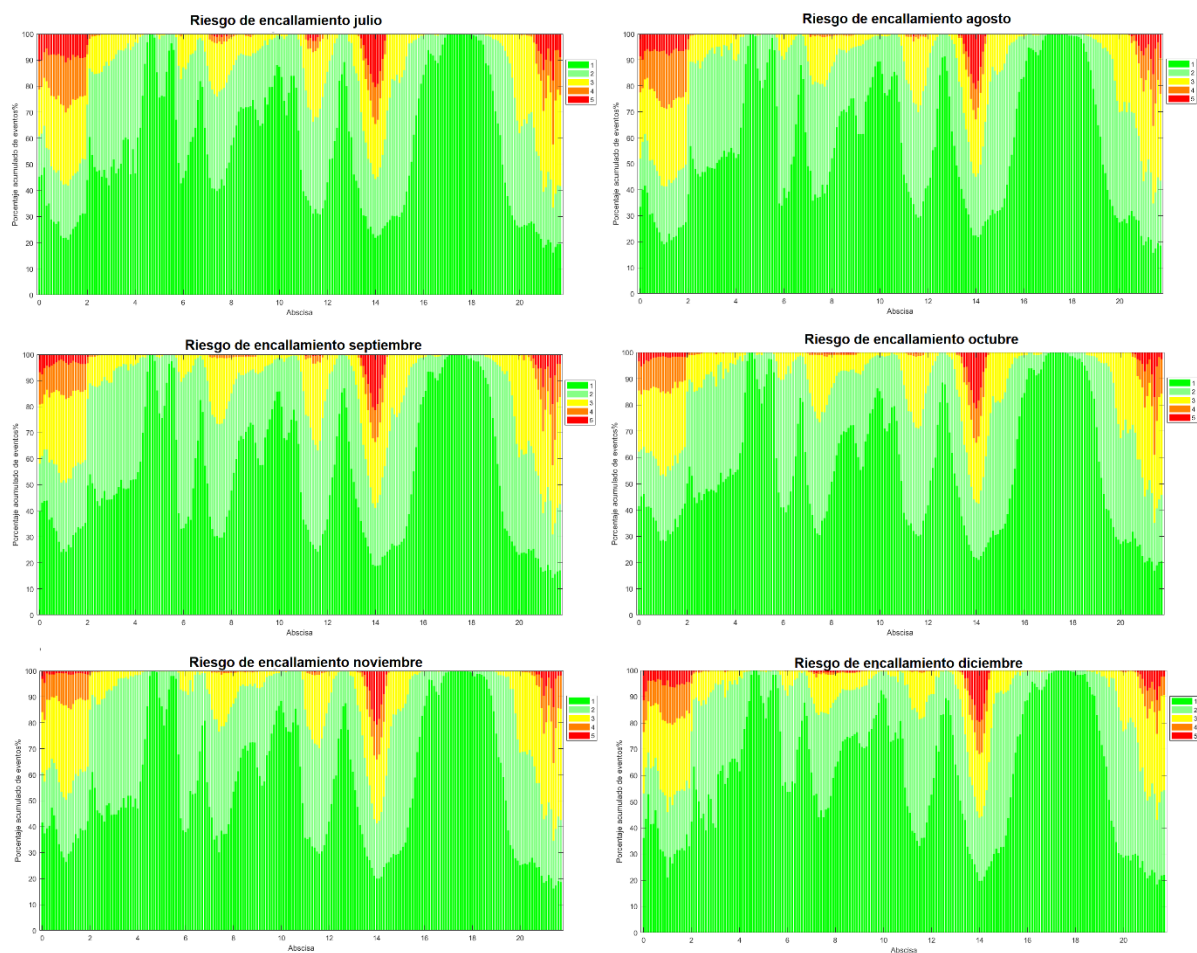


Figura 9-5. Resultados del modelo de riesgo para encallamiento en el sector de estudio julio a diciembre

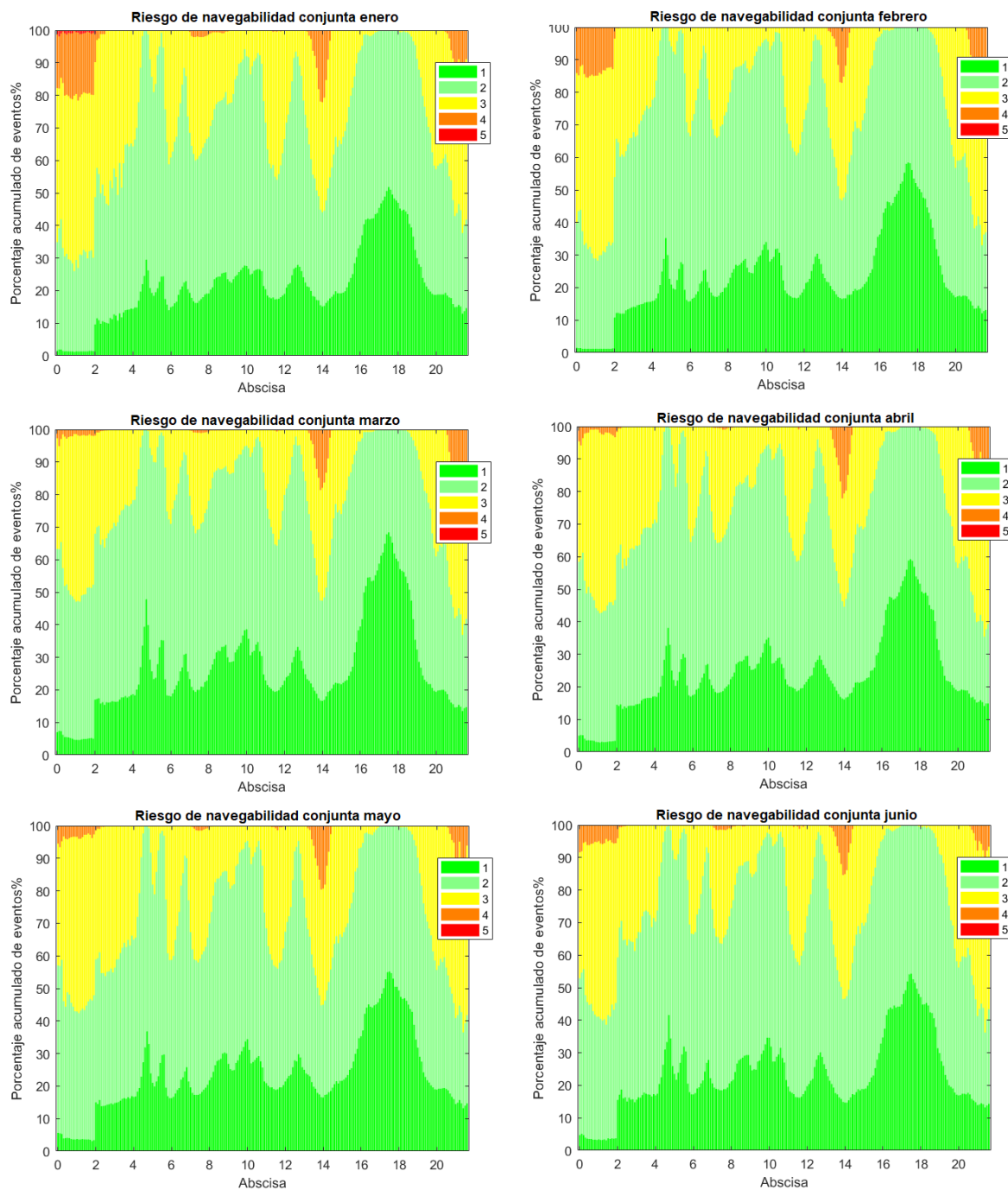
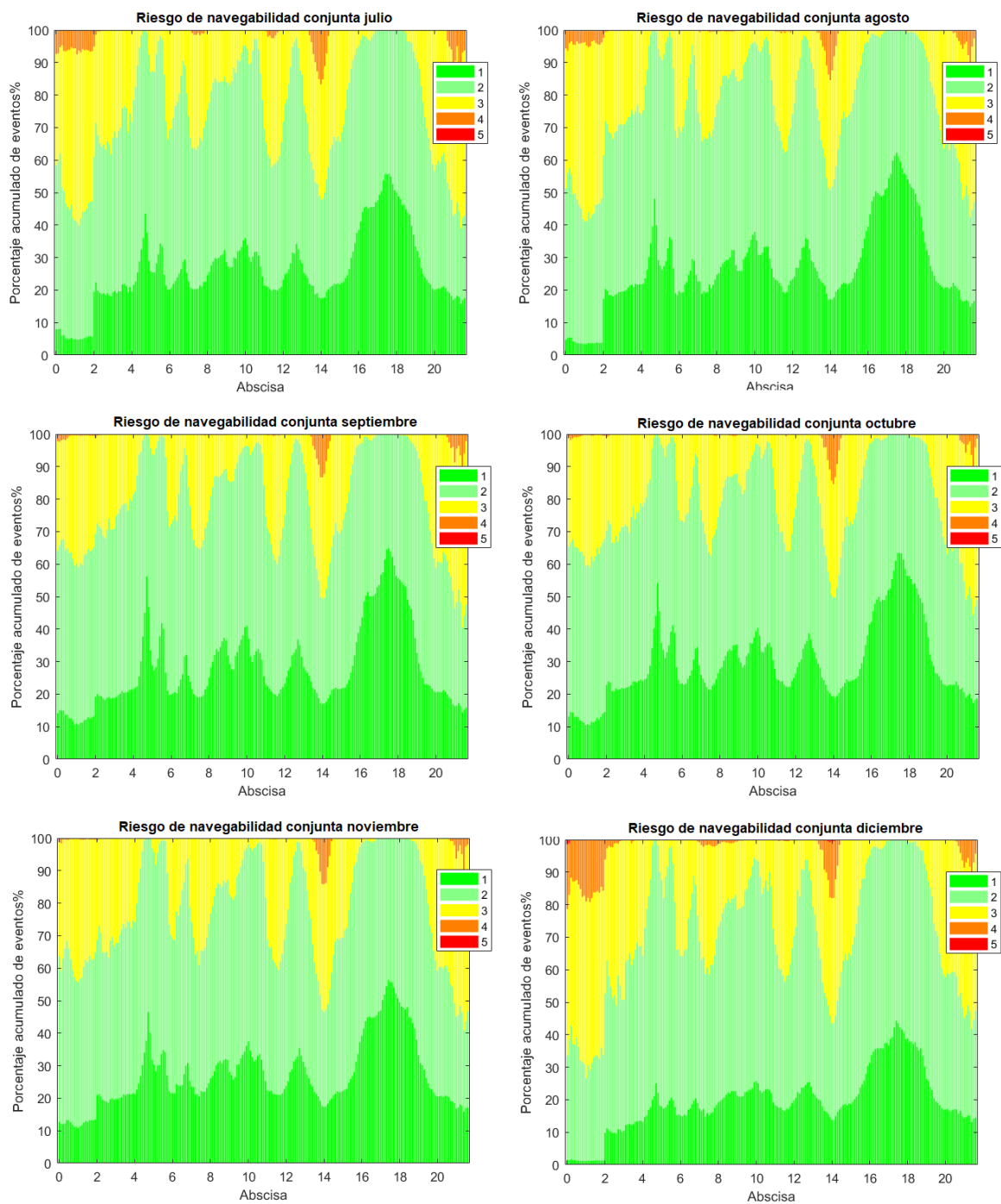


Figura 9-6. Resultados del modelo de riesgo conjunto en el sector de estudio enero a junio



*Figura 9-7. Resultados del modelo de riesgo conjunto en el sector de estudio julio a diciembre*